

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

Л.В. Виноградов

Кафедра теплотехники и тепловых двигателей
Российский университет дружбы народов
Ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В статье рассмотрено автоматизированное профилирование лопаток компрессора на базе симметричного профиля С-4.

Ключевые слова: компрессор, профиль лопатки, хорда лопатки, высота лопатки, средняя линия профиля.

На определенном этапе проектирования компрессора строятся профили компрессорных лопаток.

Существует ряд методов построения профилей лопаток. В инженерной практике широко применяются графические и аналитические методы, использующие некоторые исходные аэродинамические профили, характеристики которых известны из экспериментальных данных.

Задача профилирования лопаток компрессора на базе исходных аэродинамических профилей может быть разделена на две части: построение средней линии профиля и построение профилей лопаток [1].

Для решения первой части задачи среднюю линию исходного профиля изгибают по дуге круга или по параболе так, чтобы углы у передней и задней кромок обеспечить соответствующие углы χ_1 и χ_2 [1].

Задача построения одиночной параболы решена в работе [2], где представлена автоматизированная система построения параболического участка профиля лопатки. Следует отметить, что математическая модель (ММ) рассматриваемой параболы — алгоритмическая, так как аналитического выражения парабола не имеет. В связи с тем, что чисто графический способ построения средней линии недостаточно точен, часто прибегают к графоаналитическому построению.

При графическом построении профиля полученная средняя линия разбивается на большое число равных отрезков так, чтобы длина каждого отрезка составляла целое число процентов (2—4%) от длины средней линии. После этого по обе стороны средней линии по нормальям к ней, восстановленным в конце каждого отрезка, откладывается половина толщины исходного профиля. Полученные точки соединяются плавной кривой, которая и представляет собой очертание профиля [1].

Известно, что графический способ является приближенным, так как графическое восстановление нормали к кривой довольно неточно. Кроме того, графическое профилирование непроизводительно, что особенно проявляется при многовариантных построениях. В современных условиях аналитические методы часто сочетаются с использованием электронных вычислительных машин.

В настоящей статье представлен пакет прикладных программ (ППП) для автоматизированного проектирования в среде *Mathcad* лопаток компрессора на базе исходного симметричного аэродинамического профиля С-4 [1; 3].

Пакет включает программные модули: *ID_C_4.xmcd*, *Pp_C_4_Окр.mct*, *C_4_Окр_5.xmcd*, *C_4_Окр_10.xmcd*, *C_4_Окр_15.xmcd*, *ПРОТОКОЛ_C_4_Окр.xmcd*.

Программа вводит исходные данные: матрицу координат исходного симметричного профиля, хорду профиля b , радиусы скругления входной и выходной кромок r_1 и r_2 ; формирует уравнения верхней и нижней частей профиля и строит профиль С-4.

Ниже приводится программа *ID_C_4.xmcd*.

ПРОГРАММА построения исходного компрессорного профиля С-4

Относительное расстояние от передней кромки от $b - x$;
половина толщины профиля в процентах от $b - y$.

Хорда профиля - b

$b := 100$

$$M1 := \begin{pmatrix} 0.26325 & 1.25 & 2.5 & 5.0 & 7.5 & 10 & 15 & 20 & 30 \\ 0.75 & 1.65 & 2.27 & 3.08 & 3.62 & 4.02 & 4.55 & 4.83 & 5.0 \end{pmatrix}$$

$$M2 := \begin{pmatrix} 40 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 95 & 99,4 \\ 4.89 & 4.57 & 4.05 & 3.37 & 2.54 & 1.60 & 1.06 & 0.6 \end{pmatrix}$$

Формирование единой матрицы абсцисс и ординат исходного профиля

$M1 := \text{augment}(M1, M2)$

Формирование векторов абсцисс и ординат исходного профиля

$$Vx := (M1^T)^{(0)}. Vy := (M1^T)^{(1)}$$

Параметрическая форма уравнений входной и выходной кромок и окружности для максимальной толщины профиля

Радиус скругления входной кромки $r_1 := 1.2$

$$x_1(\theta) := r_1 \cdot \cos(\theta) + r_1. y_1(\theta) := r_1 \cdot \sin(\theta)$$

Радиус скругления выходной кромки профиля $r_2 := 0.6$

$$x_2(\theta) := r_2 \cdot \cos(\theta) + (b - r_2). y_2(\theta) := r_2 \cdot \sin(\theta)$$

максимальная толщина профиля $d := 10$

абсцисса максимальной толщины профиля $e_{\max} := 30$

$$x_{\max}(\theta) := \frac{d}{2} \cdot \cos(\theta) + e_{\max}. y_{\max}(\theta) := \frac{d}{2} \cdot \sin(\theta)$$

Сплайн - интерполяция контура профиля кубическим сплайном

$$S_{c4}(x) := \text{interp}(\text{cspline}(Vx, Vy), Vx, Vy, x)$$

Уточнение абсциссы точки сопряжения спинки профиля и входной кромки

Начальное значение полярного угла точки сопряжения

$$\theta := 3 \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$\theta_1 := \text{root}(y_1(\theta) - 0.75, \theta) \quad \theta_1 := 2.466$$

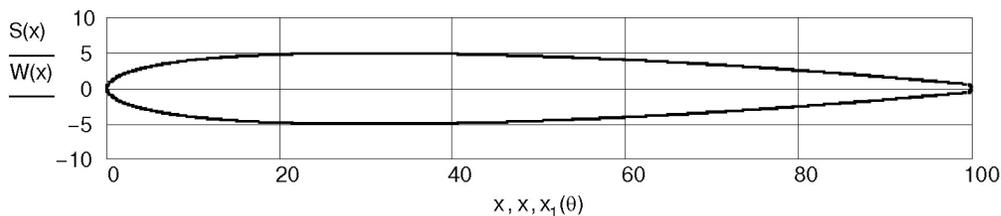
$$y_1(\theta_1) = 0.75 \quad x_1(\theta_1) = 0.26325$$

Уравнение выпуклой части профиля (спинки)

$$S(x) := \begin{cases} \sqrt{r_1^2 - (x - r_1)^2} & \text{if } 0 \leq x < x_1(\theta_1) \\ S_{c4}(x) & \text{if } x_1(\theta_1) \leq x < (b - r_2) \\ \sqrt{r_2^2 - [x - (b - r_2)]^2} & \text{if } b - r_2 < x \leq b \end{cases}$$

Уравнение нижней (симметричной) части профиля

$$W(x) := -S(x)$$



Исходный компрессорный профиль С-4
Конец программы

Подпрограмма *Pp_C_4_Okp.mct* является программой-шаблоном, в которой решается задача построения изогнутого компрессорного профиля с заданными углами χ_1 и χ_2 и расчета его координат. Для построения изогнутого профиля с определенными углами достаточно программу-шаблон сохранить под оригинальным именем и задать величину угла χ (в силу того что средняя линия профиля изгибается по дуге окружности, углы χ_1 и χ_2 равны).

Ниже приводится подпрограмма *Pp_C_4_Okp.mct*.

Программа построения компрессорного профиля С-4 со средней линией в виде дуги окружности

Reference: C\ID_C-4.xmcd

Угол изгиба профиля $\chi := 5 \cdot \frac{\pi}{180}$

хорда профиля $b = 100$

Радиус средней линии профиля в виде дуги окружности, проходящей через центры окружностей входной и выходной кромок

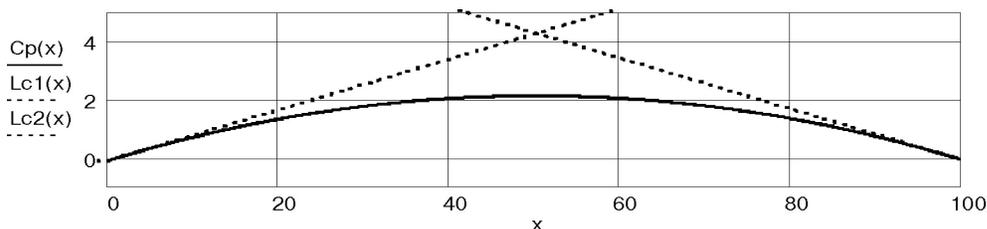
$$R_{cl} := \frac{b - (r_1 + r_2)}{2 \cdot \sin(\chi)}. \quad R_{cl} = 563.359$$

Уравнение окружности средней линии в прямоугольных координатах XY

$$Cp(x) := \sqrt{R_{cl}^2 - \left[x - \left(\frac{b + r_1 - r_2}{2} \right) \right]^2} - R_{cl} \cdot \cos(\chi)$$

Уравнения линейных концевых участков средней линии

$$Lc1(x) := \tan(\chi) \cdot (x - r_1). \quad Lc2(x) := \tan(-\chi) \cdot (x - b + r_2).$$



Средняя линия с касательными со стороны входной и выходной кромок

Общее уравнение средней линии

$$Cp(x) := \begin{cases} Lc1(x) & \text{if } 0 < x < r_1 \\ Cp(x) & \text{if } r_1 < x < b - r_2 \\ Lc2(x) & \text{if } b - r_2 < x < b \end{cases}$$

Первая производная радиусной части средней линии

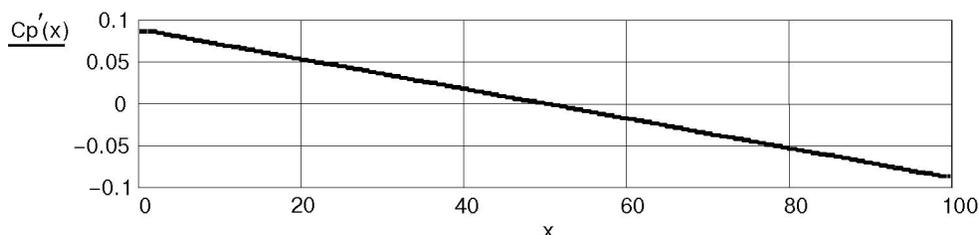
$$Cp'(x) := \frac{b + r_1 - r_2 - 2 \cdot x}{2 \cdot \sqrt{R_{cl}^2 - \left(\frac{1}{2} \cdot r_2 - \frac{1}{2} \cdot r_1 - \frac{1}{2} \cdot b + x \right)^2}}$$

Первая производная линейных участков на входе и выходе

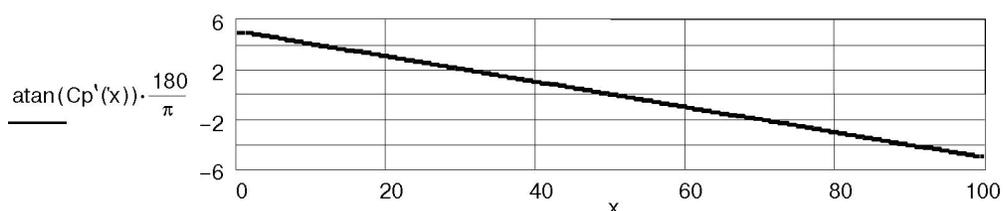
$$Lc1'(x) := \tan(\chi). \quad Lc2'(x) := -\tan(\chi)$$

Общее уравнение касательной к средней линии

$$Cp'(x) := \begin{cases} Lc1'(x) & \text{if } 0 < x < r_1 \\ Cp'(x) & \text{if } r_1 < x < b - r_2 \\ Lc2'(x) & \text{if } b - r_2 < x < b \end{cases}$$



Изменение первой производной от средней линии по длине хорды



Изменение угла наклона касательной к средней линии по длине хорды профиля, град

Угол наклона касательной к средней линии, рад $\alpha_{cp}(x) := \text{atan}(Cp'(x))$

Абсцисса спинки профиля с криволинейной средней линией

$$x_s(x) := x - S(x) \cdot \sin(\alpha_{cp}(x))$$

Ордината спинки профиля с криволинейной средней линией

$$y_s(x) := Cp(x) + S(x) \cdot \cos(\alpha_{cp}(x))$$

Абсцисса корытца профиля с криволинейной средней линией

$$x_w(x) := x - W(x) \cdot \sin(\alpha_{cp}(x))$$

Ордината корытца профиля с криволинейной средней линией

$$y_w(x) := Cp(x) + W(x) \cdot \cos(\alpha_{cp}(x))$$

Формирование вектора координат изогнутого профиля

$$N := 100 \quad i := 0 \dots N \quad X_i := 0.0001 + 99 \cdot \frac{i}{N}$$

$$XS_i := x_s(X_i) \quad YS_i := y_s(X_i) \quad XW_i := x_w(X_i)$$

$$YW_i := y_w(X_i)$$

Интерполяция координат контура изогнутого профиля кубическим сплайном

$$Spnk(x) := \text{interp}(\text{cspline}(XS, YS), XS, YS, x)$$

$$Krt(x) := \text{interp}(\text{cspline}(XW, YW), XW, YW, x)$$

Конец программы

Программа *PROTOKOL_C_4_Okp.xmcd* аккумулирует результаты расчетов серии программ, используя функцию *Reference*. В настоящей работе в программе-протоколе обобщены результаты расчетов для углов изгиба средней линии исходного профиля C_4 0, 5, 10 и 15°.

Ниже приводится программа *PROTOKOL_C_4_Okp.xmcd*.

ПРОГРАММА-ПРОТОКОЛ

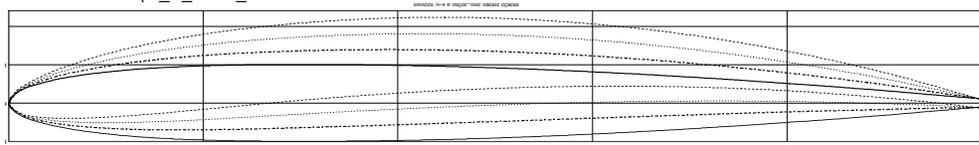
построения серии компрессорных профилей С-4 со средней линией в виде окружности

Reference:C:\ID_C_4.xmcd

Reference:C:\C_4_OKP_5.xmcd

Reference:C:\C_4_OKP_10.xmcd

Reference:C:\C_4_OKP_15.xmcd



Совмещенные профили С-4 при углах изгиба: 0 (исходный профиль), 5, 10, 15°

Конец программы

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы.

1. Разработан пакет прикладных программ для автоматизированного проектирования лопаток компрессора на базе симметричного стандартного профиля С-4.
2. Проведенные расчеты показали работоспособность и надежность ППП.
3. Рассмотренный в работе ППП может быть использован как пакет-шаблон для разработки ППП для профилирования лопаток компрессора на базе других стандартных аэродинамических компрессорных профилей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Холщевников И.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. — М.: Машиностроение, 1979.
- [2] Виноградов Л.В. Система автоматизированного проектирования параболического контура // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2004. — № 1(8). — С. 43—47.
- [3] Подобуев Ю.С., Селезнев К.П. Теория и расчет осевых и центробежных компрессоров. — М.-Л.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1957.

A COMPRESSOR BLADE PROFILE

L.V. Vinogradov

The Department of Combined ICE
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

An article presents a method for calculating the coordinates of a compressor blade profile based of circle.

Key words: the compressor, a structure, a chord, height, an average line of a structure.