

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.925.86+621.51.003.13

Борисенко В.Д.

Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського

Устенко І.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кузьма К.Т.

Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського

УЗГОДЖЕННЯ ОБВОДІВ СПИНКИ Й КОРИТЦЯ ПРОФІЛІВ ЛОПАТОК ОСЬОВИХ КОМПРЕСОРІВ ІЗ ВХІДНИМИ ТА ВИХІДНИМИ КРОМКАМИ

Робота присвячена вдосконаленню геометрії профілів лопаток осьових компресорів у місцях переходу їх вхідних і вихідних кромок до обводів спинки й коритця. Задача розв'язується шляхом знаходження числовим методом точок стикування кіл вхідних і вихідних кромок зі сплайнами Анселона-Лорана, якими подаються сукупності точок, розташованих на обводах спинки й коритця профілю.

Ключові слова: осьовий компресор, узгодження, вхідна та вихідна кромки, спинка, коритце.

Постановка проблеми. Проектування та виготовлення газотурбінних двигунів є складною науково-технічною проблемою. Одним із основних компонентів цих двигунів є осьові компресори – газодинамічні машини, призначені для стискування повітря, яке відбувається за умови, що рух повітря має дифузійний характер. У зв'язку з цим компресори дуже чутливі навіть до незначних огріхів, які можуть мати місце в геометрії їх профілів. На підприємствах, які проектують і виготовляють компресори, напрацьовані певні підходи до геометричного моделювання профілів робочих і напрямних лопаток. Упровадження у виробництво сучасного технологічного устаткування висуває певні вимоги до якості подання профілів лопаток. Те, на що раніше майже не звертали увагу, з появою високошвидкісних п'ятикоординатних обробних центрів поставило перед проектантами певні проблемні питання. Передусім це стосується узгодження вхідних і вихідних кромок профілів, які описуються дугами кіл, з обводами спинки й коритця та, зокрема, визначення так званих лімітаційних точок, де саме й відбувається стикування дуг кіл вхідної та вихідної кромки зі спинкою й коритцем профілю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній літературі з прикладної геометрії можна знайти достатньо різноманітних, ефективних методів геометричного моделювання плоских і просторових кривих [5; 7]. При цьому застосовуються явні, неявні, параметричні форми подання кривих, у тому числі в натуральній параметризації [2]. У роботі [1] зроблена спроба розв'язати подібну задачу, але, як з'ясувалося пізніше, безпосередньо між вхідною кромкою та обводом спинки була ділянка прямолінійної форми. Це з'ясувалося в результаті розрахунку течії робочої речовини в решітці профілів. Епюра розподілу швидкості по профілю біля вхідної кромки мала незадовільний характер. Засобами OpenGL вдалося подивитися на вхідну ділянку профілю під час багатократного її збільшення. Це послугувало підставою для розроблення нового методу узгодження вхідної та вихідної кромки з обводами спинки й коритця.

Отже, на перший погляд поставлена мета роботи є досить простою. У дійсності довелося витратити певні зусилля на розв'язання доволі складного й водночас важливого питання.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення методу вдосконалення профілів лопаток осьових компресорів, обводи яких подаються сукуп-

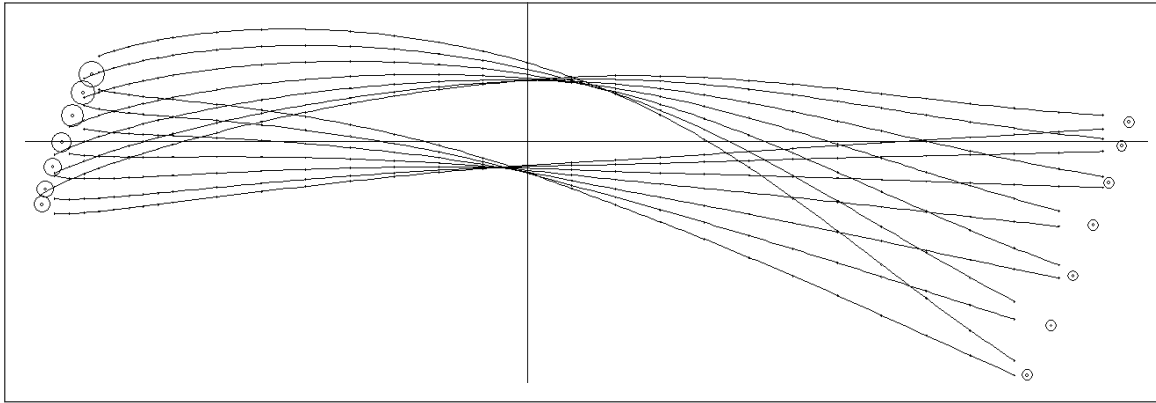


Рис. 1. Вихідні профілі плоских перерізів лопатки компресора

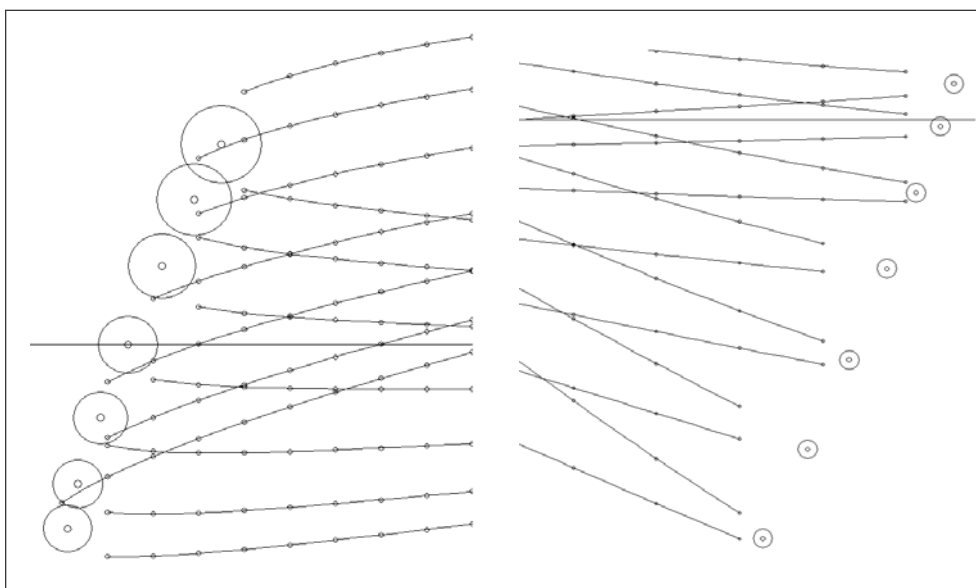


Рис. 2. Вхідні та вихідні ділянки профілів

ністю дискретних точок, аналітичне доведення цих обводів до дуг кіл вхідних і вихідних кромок, визначення так званих лімітаційних точок, необхідних під час виготовлення лопаток осьових компресорів на сучасному технологічному устаткуванні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Формування просторової лопатки осьового компресора відбувається шляхом розподілу по висоті проточної частини певної сукупності профілів плоских перерізів. Профілі цих перерізів задаються в головній координатній системі, зв'язаній з кореневим перерізом лопатки. Початок координатної системи знаходиться в центрі ваги перерізу. Профілі всіх вищерозташованих перерізів визначаються в координатній системі кореневого перерізу лопатки (рис. 1).

З одного боку, це зручно, адже точки, які визначають обводи профілів, мають однакові абсциси.

Але, з іншого боку, це призводить до ситуації, коли прикінцеві точки не закінчуються на колах вхідних і вихідних кромок, а це є неприпустимим під час оброблення лопаток на сучасному технологічному обладнанні, яке висуває підвищені вимоги до якості геометричного моделювання профілів поперечних перерізів лопаток компресорів.

Це проявилось насамперед у посиленні вимог до точності узгодження вхідних і вихідних кромок з обводами спинки й коритця, знаходженні точних значень координат лімітаційних точок, загущенні точок на вхідній і вихідній кромках, забезпеченні плавності проходження вектора, нормального до поверхні пера лопатки, як уздовж обводів профілів, так і по висоті лопатки.

Задоволення цих вимог має виконуватися та реалізовуватися на базі відповідного математичного апарату, який допускає надійну реалізацію

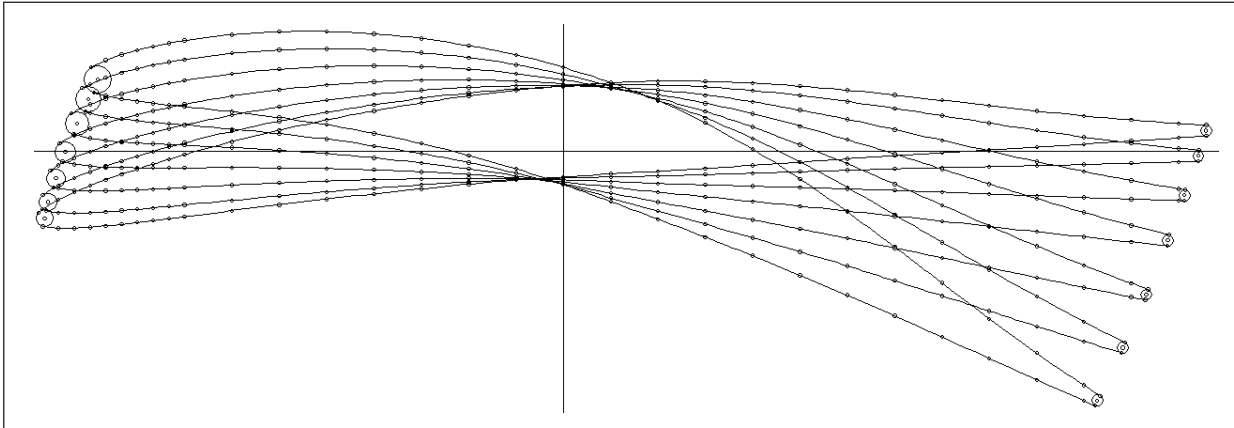


Рис. 3. Удосконалені профілі плоских перерізів лопатки осевого компресора

на комп'ютері завдяки застосуванню стійких числових обчислювальних процесів.

Сукупність із семи профілів, розташованих у центральній координатній системі кореневого перерізу, показана на рис. 1. На рис. 2 у збільшеному масштабі показані ділянки профілів лопатки в місцях розташування вхідних і вихідних кромки, які описуються дугами кіл.

Візуалізація профілів показала, що існують деякі огріхи подання кривих обводів, особливо в місцях їх спряження з вхідними та вихідними кромками.

Отже, виникають задачі, пов'язані з удосконаленням геометрії профілів лопаток осевих компресорів, зі згладжуванням вихідних даних обводів спинки й коритця, заданих дискретною сукупністю точок, і забезпеченням їх сполучення з дугами кіл, які описують вхідні та вихідні кромки плоских перерізів лопаток осевих компресорів.

Для згладжування координат точок обводів профілю застосовуються інтерполяційно-апроксимаційні сплайни, отримані з використанням алгоритму Анселона-Лорана, основні положення якого викладені в джерелах [3; 4; 8]. У роботі застосовується сплайн непарного степеня.

Під час побудови інтерполяційного сплайну $L(x)$ розв'язується задача, яка визначається такими умовами [3]:

$$L(x_i) = y_i, \quad i = 1, \dots, N;$$

$$\int_{x_1}^{x_N} \left(\frac{d^p L}{dx^p} \right)^2 dx = \min,$$

а під час побудови апроксимаційного сплайну $L_\alpha(x)$ – задача, яка відповідає умовам мінімуму відхилень від вихідних точок:

$$\alpha \int_{x_1}^{x_N} \left(\frac{d^p L_\alpha}{dx^p} \right)^2 dx + \sum_{i=1}^N [L_\alpha(x_i) - y_i]^2 = \min,$$

де N – кількість точок x_i, y_i , які необхідно згладити; p – параметр, який керує степенем сплайну ($2p - 1$); a – параметр згладжування.

Для одержання поліноміального подання серії сплайн-функцій на інтервалі $[x_j, x_{j+1}]$ використовується залежність, яка включає до себе коефіцієнти розкладу сплайну:

$$L_j(x) = \sum_{k=0}^{2p-1} A_j^{(k)} \frac{(x - x_j)^k}{k!}, \quad j = 1, \dots, N - 1,$$

де j – номер відрізка інтервалу;

$A_j^{(k)}$ – коефіцієнти розкладу сплайну на j -му відрізку.

На базі алгоритму Анселона-Лорана розроблено підпрограму побудови інтерполяційних та апроксимаційних сплайнів.

Поставлена задача розв'язується так. Для деякої точки A плоского перерізу профілю визначаються її координати за умови, що відомий кут ϕ , який вимірюється від горизонтальної осі в напрямку протилежному руху годинникової стрілки:

$$x_A = x_{O_i} - r_i \cos \phi;$$

$$y_A = y_{O_i} + r_i \sin \phi,$$

де O_i – центр кола вхідної кромки i -го перерізу; r_i – радіус кола вхідної кромки i -го перерізу.

У цій самій точці визначається кут нахилу дотичної ψ , який дорівнює $\psi = \pi/2 - \phi$.

Координати точки A додаються до масиву координат точок, якими задається обвід спинки профілю. За новим масивом координат будується сплайн Анселона-Лорана. За бажанням користувача можна будувати інтерполяційний або апроксимаційний сплайн. Вибір типу сплайну залежить від необхідності згладжування координат вихідних точок профілю.

Кут нахилу дотичної до сплайну в точці A дорівнює:

$$\beta = \arctg L'_\alpha(x_A).$$

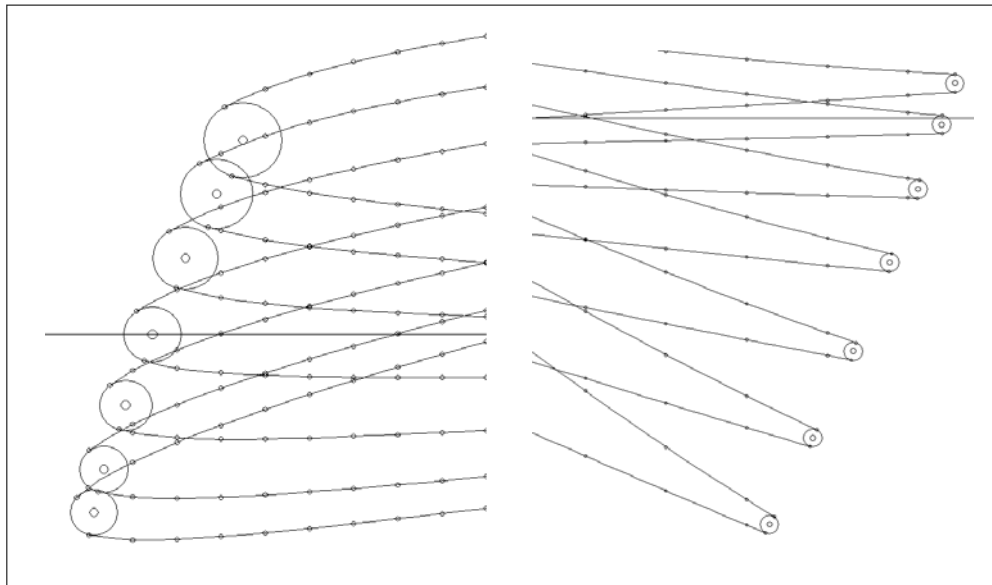


Рис. 4. Удосконалені вхідні та вихідні ділянки профілів

Отриманий кут β порівнюється з кутом ψ . Якщо різниця цих кутів перевищує наперед задану точність розрахунків, то береться нове значення кута ϕ . Для надання процесу вибору кута ϕ упорядкованого характеру застосовано вискоефективний алгоритм розв'язання трансцендентних рівнянь, запропонований у роботі [6]. Цей алгоритм сполучає безвідмовність бісекції з асимптотичною швидкістю методу січних.

Узгодження вхідної кромки профілю з коритцем виконується аналогічним чином. Висловлене також стосується й узгодження вихідної кромки зі спинкою й коритцем профілю.

На рис. 3 показані профілі компресорної лопатки, вхідні та вихідні ділянки яких узгоджені з обводами спинки й коритця профілів. З розгляду рисунку випливає, що вказані обводи доведені до кіл кромок із явним визначенням лімітаційних точок.

На рис. 4 у збільшеному масштабі показані вхідні та вихідні ділянки профілів лопатки, що розглядається, отримані після проведення зазначених вище заходів. Порівнюючи данні, наведені на рис. 2 і 4, можна відмітити якісне покращення профілів, що, як відмічалось вище, матиме позитивний вплив на виготовлення лопаток компресорів на високошвидкісних обробних центрах.

Для більш наочного підтвердження працездатності запропонованого методу вдосконалення профілів компресорних лопаток на рис. 5 показано вхідну ділянку профілю кореневого перерізу. На цьому рисунку чітко видно лімітаційну точку 1, а сама ділянка 12 має криволінійний характер,

вона плавно переходить у коло вхідної кромки профілю.

Зазначимо, що узгодження обводів спинки й коритця профілю з вхідними та вихідними кромками виконано із застосуванням спеціально розробленого комп'ютерного коду. Усі рисунки є скриншотами цього коду.

Висновки. Запропонований метод узгодження кіл вхідної та вихідної кромки профілів зі згладженими обводами спинки й коритця підтвердив свою працездатність і дав змогу ліквідувати огріхи в завданні обводів профілів лопаток осьових компресорів, що доводиться виконаними розрахунками й отриманими графічними результатами.

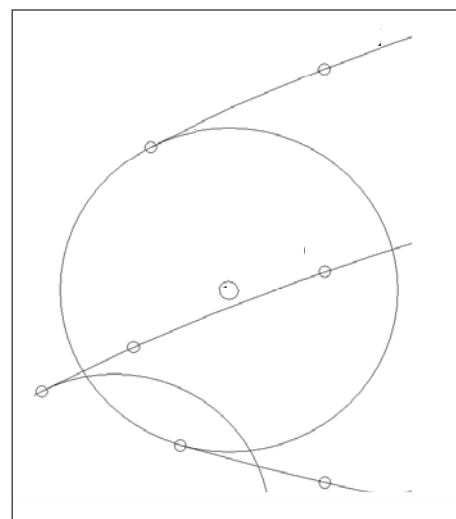


Рис. 5. Вхідна ділянка профілю кореневого перерізу лопатки

Список літератури:

1. Борисенко В.Д., Устенко С.А., Спіцин В.А. Удосконалення геометрії профілів лопаток осевих компресорів. *Сборник научных трудов: межведомственный научно-технический сборник*. Спецвыпуск. Киев: Випол, 2004. С. 49–54.
2. Борисенко В.Д., Устенко С.А., Устенко І.В. Геометричне моделювання кривих ліній і поверхонь у натуральній параметризації. Миколаїв: МНУ, 2018. 220 с.
3. Василенко В.А. Сплайн-функции: теория, алгоритмы, программы. Новосибирск: Наука, 1983. 214 с.
4. Лоран П.Ж. Аппроксимация и оптимизация. Москва: Мир, 1975. 496 с.
5. Савелов А.А. Плоские кривые. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. 294 с.
6. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. Москва: Мир, 1980. 279 с.
7. Шикин Е.В., Каменецкий М.М. Кривые на плоскости и в пространстве. Москва: Фазис, 1997. 325 с.
8. Laurent P.J., Anselone P.M. A general method for construction of interpolating or smoothing spline-functions. M.R.C. Technical Report 834. University of Wisconsin, 1967, Numerical Mathematics, 12 (1968). P. 66–82.

СОГЛАСОВАНИЕ ОБВОДОВ СПИНКИ И КОРЫТЦА ПРОФИЛЕЙ ЛОПАТОК ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ С ВХОДНЫМИ И ВЫХОДНЫМИ КРОМКАМИ

Работа посвящена совершенствованию геометрии профилей лопаток осевых компрессоров в местах перехода их входных и выходных кромок к обводам спинки и корытца. Задача решается путем нахождения численным методом точек стыковки окружностей входных и выходных кромок со сплайнами Анселона-Лорана, которыми описываются совокупности точек, расположенных на обводах спинки и корытца профиля.

Ключевые слова: осевой компрессор, согласование, входная и выходная кромки, спинка, корытце.

MATCHING OF THE PRESSURE AND SUCTION PROFILES OF AXIAL FLOW COMPRESSORS BLADE WITH LEADING AND TRAILING EDGES

The work is devoted to improving the geometry of the profiles of axial compressor blades at the points of transition of their leading and trailing edges to the pressure and suction contours. The problem is solved by finding the joining points of the circles of the leading and trailing edges with Anselon-Laurent splines, which describe the sets of points located on the pressure and suction contours of the profile.

Key words: axial flow compressor, matching, leading and trailing edges, pressure and suction profiles.