

УДК 621.125

DOI: 10.33310/2524-0978-2019-1-7-13-19

**Валерій БОРИСЕНКО**

[borisenko.valery@gmail.com](mailto:borisenko.valery@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-0857-0708

**Оксана КОРЧАГІНА**

ORCID: 0000-0001-9288-1834

**Анжеліка РЯБОВА**

ORCID: 0000-0002-6153-8707

м. Миколаїв

## АДАПТАЦІЯ ПРОФІЛІВ НАСА 65-ОЇ СЕРІЇ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ЛОПАТОК ОСЬОВИХ КОМПРЕСОРИВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

*В роботі розглядається питання узгодження профілів компресорних лопаток, які задаються певною сукупністю дискретних точок, з вхідними та вихідними кромками. Для аналітичного подання обводів профілів застосовані інтерполяційно-апроксимаційні сплайни Анселона-Лорана. Пошук точок стикування кіл вхідної та вихідної кромки реалізується числовим методом шляхом розв'язання трансцендентного рівняння, побудованого як різниця кутів нахилу дотичних до кола вхідної чи вихідної кромки та до обводу профілю, поданого сплайном Анселона-Лорана.*

**Ключові слова:** профілі НАСА 65-ої серії, геометричне моделювання, лопатка, осьовий компресор, вхідна та вихідна кромки.

### Постановка проблеми

Осьові компресори широко поширені в конструкціях газотурбінних двигунів, які застосовуються в транспортній та стаціонарній енергетиці [4, 6, 9]. Ефективність цих двигунів в значній мірі залежить від геометрії рухомих і нерухомих лопаткових апаратів компресорів. Підвищення ККД компресорів навіть на долі відсотків призводить у підсумку до значної економії паливних ресурсів.

Зазвичай профілі лопаток осьових компресорів формуються шляхом вигину добре відпрацьованих в аеродинамічних трубах профілів вздовж середньої (скелетної) лінії.

Зараз у практиці розробки проектів осьових компресорів газотурбінних двигунів, особливо закордонній, дуже часто застосовуються аеродинамічні профілі 65-ої серії, запропоновані в НАСА – National Advisory Committee for Aeronautics (зараз NASA – National Aeronautics and Space Administration). У цій організації протягом багатьох років проводилися дослідження аеродинамічних профілів для різних прак-

тичних застосувань: для крил літаків, лопаток турбін і компресорів, вітряків тощо. Профілі, призначені для осьових компресорів, отримали назву профілів 65-ої серії.

У табл. 1 наведені координати профілю, який розглядається в цій роботі. Абсциси та ординати точок, а їх усього 26, задаються у безрозмірному вигляді. Їх потім адаптують до розмірів проектованої проточної частини компресора.

Радіус кола вхідної кромки дорівнює 0,687.

На рис. 1 візуалізовані вихідні дані, наведені в табл. 1. Вихідні точки цього симетричного профілю зображені у вигляді кіл малого радіусу. З розгляду цього рисунку випливає, що на ньому відсутні вхідна та вихідна кромки. Відносно вхідної кромки можна додати, що розробники цих профілів вказали радіус вхідної кромки профілю. Додана до профілю вхідна кромка зображена на рис. 2 у вигляді кола.

Оскільки компресорні профілі мають відносно невелику товщину (вона визначається незначною часткою хорди), то обидва рисунки мають продовгуватий вигляд. У

зв'язку з цим на рис. 2 неможливо чітко показати вхідну частину профілю і, отже, важко уявити взаємне розташування кола вхідної кромки та вихідних точок обводу профілю.

Табл. 1. Координати вихідних точок профілю 65-ої серії

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Координата $X$	0	0,5	0,75	1,25	2,5	5,0	7,5	10,0	15,0
Координата $Y$	0	0,772	0,932	1,169	1,574	2,177	2,647	3,040	3,666
№ точки	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Координата $X$	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0
Координата $Y$	4,143	4,503	4,760	4,924	4,996	4,963	4,812	4,530	4,146
№ точки	19	20	21	22	23	24	25	26	
Координата $X$	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0	
Координата $Y$	3,682	3,156	2,584	1,987	1,385	0,810	0,306	0,0	

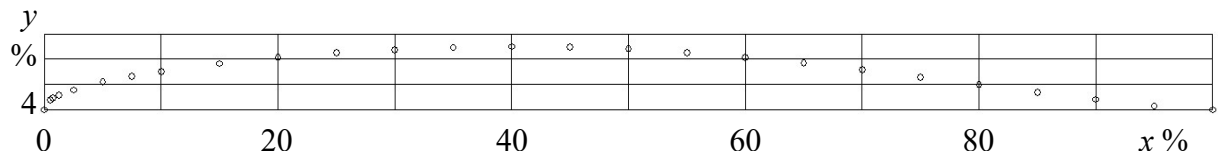


Рис. 1. Вихідні точки компресорного профілю 65-ої серії

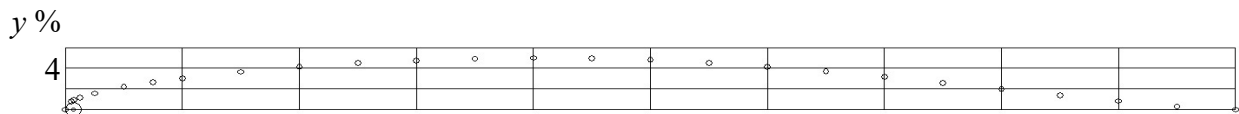


Рис. 2. Вихідні точки профілю з колом вхідної кромки

Завдяки суттєвому збільшенню масштабу зображення можна показати розташування кола вхідної кромки та точок, які примикають до неї. Це продемонстровано на рис. 3. З його розгляду чітко випливає завдання, пов'язане з визначенням точки дотику обводу профілю з вхідною кромкою.

На рис. 4 у збільшеному масштабі показано вихідну ділянку профілю. Для профілів цієї серії величина радіуса вхідної кромки не передбачається. Але з теорії компресорів випливає, що величина радіуса вхідної кромки приймається як деяка частка радіуса вхідної кромки.

Виконаний аналіз свідчить, що перш ніж застосовувати профілі 65-ої серії до формування проточних частин осьових компресорів, їх необхідно адаптувати до заданих умов проектування. Чітко визна-

читися з точками торкання криволінійного обводу профілю з колами вхідної та вихідної кромки.

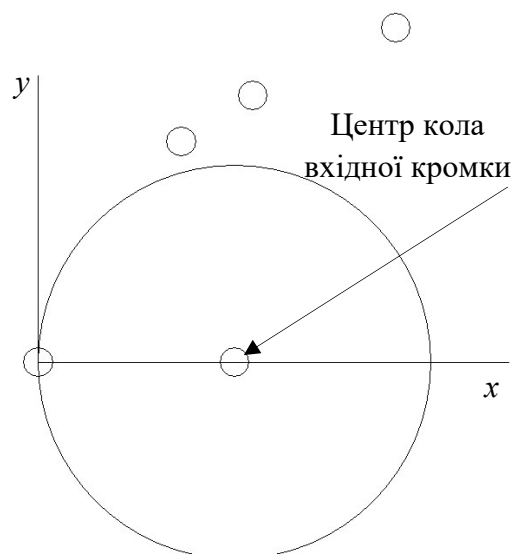


Рис. 3. Вхідна ділянка профілю



Рис. 4. Вихідна ділянка профілю

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [1] була зроблена спроба розв'язати задачу, подібну тій, яка розглядається в цій статті, але, як з'ясувалося пізніше, безпосередньо між вхідною кромкою та обводом спинки налічувалася ділянка прямолінійної форми. Виявилось це за результатами розрахунків течії робочої речовини в решітці профілів. Епюра розподілу швидкості по профілю біля вхідної кромки мала незадовільний характер. Це послужило підставою для розробки нового методу узгодження вхідної та вихідної кромки з обводами спинки і коритця.

На перший погляд, поставлена задача узгодження обводу профілю з колами вхідної та вихідної кромки є доволі простою. У дійсності довелося витратити певні зусилля на розв'язання цього складного і одночасно важливого питання. Зокрема, визначитися з методом аналітичного подання криволінійного обводу профілю. Виявилось, що для реалізації означених цілей підходять сплайнові криві.

У сучасній літературі з прикладної геометрії можна знайти достатньо ефективних методів побудови інтерполяційних і апроксимаційних сплайнів [2, 3, 7, 8]. При цьому застосовуються різноманітні форми подання сплайнів, у тому числі й параметричній.

### Постановка завдання

Розробити метод узгодження обводів компресорного профілю 65-ої серії, які подаються сукупністю дискретних точок, аналітичного доведення цих обводів до дуг кіл вхідних кромки, визначення так званих лімітаційних точок, необхідних при виготовленні лопаток осьових компресорів на сучасному технологічному устаткуванні.

### Виклад основного матеріалу

Розв'язання поставленого завдання цілком природно можна розділити на два кроки.

*Крок 1.* Узгодження обводу профілю 65-ої серії з вхідною кромкою.

Для аналітичного подання обводів профілю, що розглядається, застосовуємо інтерполяційно-апроксимаційні сплайни непарного степеню, отримані з використанням алгоритму Анселона-Лорана, основні положення якого викладені в джерелах [2, 3, 8].

При побудові інтерполяційного сплайна  $L(x)$  розв'язується задача, яка визначається наступними умовами [8]:

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

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

а при побудові апроксимаційного сплайна  $L_\alpha(x)$  – 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 сплайна ( $2p - 1$ );  $\alpha$  – параметр згладжування.

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

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

де  $j$  – номер відрізка інтервалу;  $A_j^{(k)}$  – коефіцієнти розкладу сплайна на  $j$ -му відрізку.

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

Поставлена задача узгодження обводу профілю з колом вхідної кромки розв'язується наступним чином. Для деякої точки  $A$ , що знаходиться на колі вхід-

ної кромки, визначаються її координати за умови, що відомий кут  $\varphi$ , який вимірюється від горизонтальної осі у напрямку протилежному руху годинникової стрілки:

$$x_A = x_O - r_{ex} \cos \varphi;$$

$$y_A = y_O + r_{ex} \sin \varphi,$$

де  $O$  – центр кола вхідної кромки;  $r_{ex}$  – радіус кола вхідної кромки.

У цій же точці розраховується кут нахилу дотичної  $\psi$ , який дорівнює  $\psi = \pi/2 - \varphi$ .

Координати точки  $A$  додаються до масиву координат точок, якими задається обвід 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:

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

тобто він є арктангенсом, аргументом якого є похідна від сплайна, визначена в точці  $A$ .

Отриманий кут  $\beta$  порівнюється з кутом  $\psi$ . Якщо різниця цих кутів перевищує наперед задану точність розрахунків, то береться нове значення кута  $\varphi$ . Для надання процесу вибору кута  $\varphi$  впорядкованого характеру застосовано вискоєфективний алгоритм розв'язання трансцендентних рівнянь, запропонований в роботі [5]. Цей алгоритм сполучає безвідмовність бісекції з асимптотичною швидкістю методу січних.

На рис. 5 у збільшеному масштабі показано вхідну ділянку обводу профілю з колом вхідної кромки. З розгляду рисунку випливає, що вказаний обвід доведений до кола вхідної кромки. Коло невеликого радіусу відповідає точці стикування обводу з колом вхідної кромки.

Незважаючи на те, що вхідна ділянка профілю показана у збільшеному масштабі, все ж таки немає повної впевненості, що узгодження виконано зі стовідсотковою гарантією. Можливо, що крива обводу десь перетинає коло вхідної кромки. Тобто

відбувається підрізання, що для компресорів є дуже небажаним явищем.

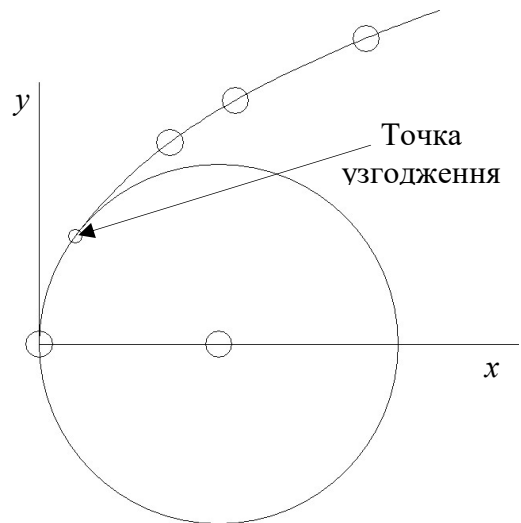


Рис. 5. Обвід профілю, узгоджений з вхідною кромкою

Для перевірки цього явища на рис. 6 у значно збільшеному вигляді показано фрагмент вхідної кромки та обводу профілю.

На цьому рисунку чітко видно точку стикування кола вхідної кромки з криволінійним обводом, який плавно переходить в коло вхідної кромки профілю. Явище підрізання відсутнє.

Зазначимо, що узгодження обводу профілю з вхідною і вихідною кромками виконано із застосуванням спеціально розробленого комп'ютерного коду. Всі рисунки, наведені у цій роботі, є скріншотами цього коду.

*Крок 2.* Вписування в обводи профілю 65-ої серії вихідної кромки.

Розв'яжемо задачу вписування в профіль кола вихідної кромки. Вище відмічалось, що радіус округлення вихідної ділянки профілю приймається як частка радіуса вхідної кромки.

Візьмемо на обводі профілю в районі вихідної кромки деяку точку  $A$ . Визначимо в ній на базі сплайну Анселона-Лорана похідну  $y'_A$ .

Складемо рівняння прямої, яка проходить через точку  $A$  перпендикулярно до кривої обводу профілю. Це рівняння матиме вигляд:

$$\frac{y - y_A}{x - x_A} = \text{tg} \alpha,$$

де  $\alpha = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} L'_\alpha(x_A)$ .

Оскільки центр кола вихідної кромки має знаходитися на осі абсцис, то ордината цієї точки буде мати нульове значення.

Після нескладних перетворень отримаємо рівняння прямої, записане відносно координати  $x$ , у наступному вигляді:

$$x = x_A + y_A L'_\alpha(x_A).$$

Для довільно обраної точки  $A$  довжина відрізка, проведеного перпендикулярно до кривої обводу, від цієї точки до осі абсцис буде дорівнювати:

$$d = y_A \sqrt{1 + [L'_\alpha(x_A)]^2}.$$

Довжина отриманого відрізка порівнюється з радіусом кола вихідної кромки. Ця різниця, яка є трансцендентним рівнянням, зводиться до нуля застосуванням алгоритму, запропонованому в роботі [5].

На рис. 7 у збільшеному масштабі показано ділянку профілю, розташовану в районі вихідної кромки. Радіус цієї кромки в два с половиною рази менше радіуса кола вхідної кромки. Додаткові позначення, виконані на цьому рисунку, акцентують увагу на тому, що коло вихідної кромки чітко вписано в профіль. Зазначимо, що на цьому рисунку показано криву нижнього обводу профілю.

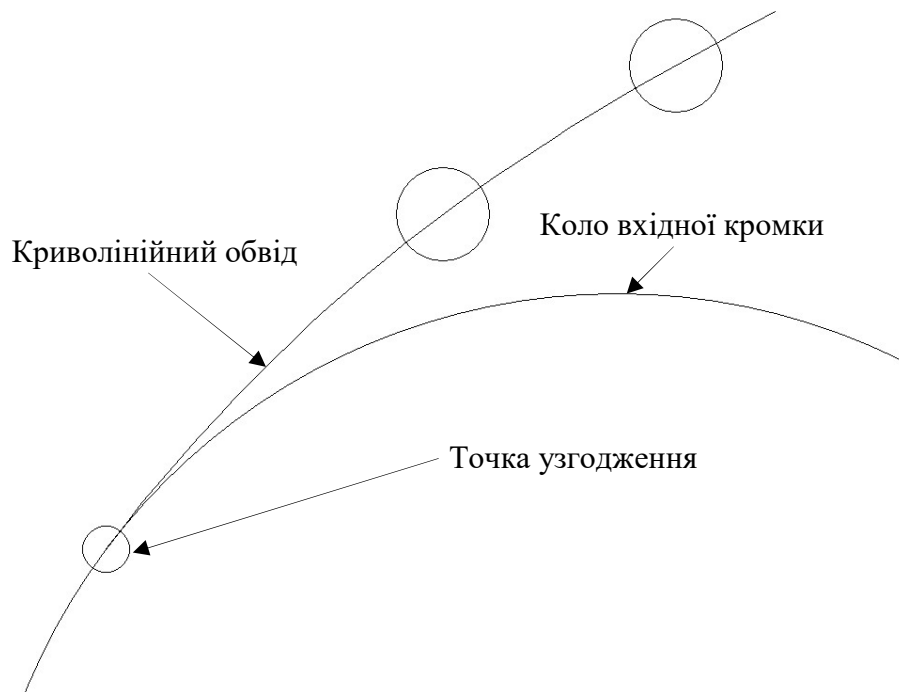


Рис. 6. Вхідна ділянка профілю у суттєвому збільшенні

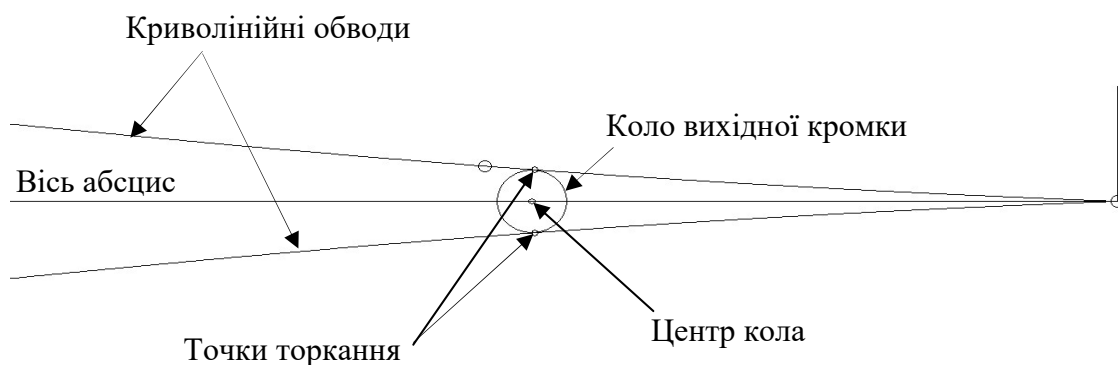


Рис. 7. Вихідна ділянка профілю

На завершення покажемо профіль компресорної лопатки 65-ої серії, отриманий після узгодження вхідної кромки з обводами профілю та вписаною в нього вихідною кромкою (рис. 8). Як впливає з розгляду цього рисунку, хорда профілю дещо

зменшилася. Це зменшення обумовлено вписуванням в профіль вихідної кромки. Його величина залежить від радіуса кола вихідної кромки. Чим більше цей радіус, тим менше хорда профілю.

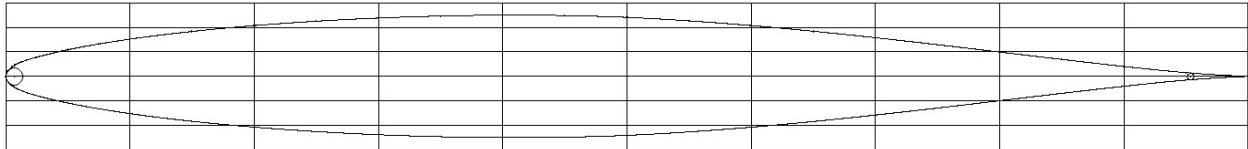


Рис. 8. Профіль компресорної лопатки 65-ої серії

### Висновки і перспективи досліджень

Виконаний аналіз геометрії профілів лопаток осьових компресорів 65-ої серії показав, що потрібно розробити заходи, пов'язані з узгодженням обводів профілів з вхідною кромкою, а також вписуванням кола вихідної кромки в профіль.

Застосування інтерполяційно-апроксимаційних сплайнів на базі алгоритму, запропонованого Анселомом и Лораном, дозволило продовжити обводи профілю до кола вхідної кромки, визначити точки спряження із запобіганням підрізання обводу профілю кола вхідної кромки.

Розроблено метод, який забезпечив можливість вписувати в профіль коло вихідної кромки. Задача вирішується шляхом розв'язання числовим методом складеного трансцендентного рівняння.

На базі запропонованих методів розроблено програмний код, який дозволяє, окрім розрахунків, візуалізувати графічні результати на екрані монітора комп'ютера.

Наступним кроком у справі геометричного моделювання профілів лопаток осьових компресорів є розробка заходів, пов'язаних із розміщенням профілю вздовж середньої (скелетної) лінії.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борисенко В.Д., Устенко С.А., Спіцин В.А. Удосконалення геометрії профілів лопаток осьових компресорів. Сборник научных трудов: Межведомственный научно-технический сборник. Спецвыпуск. Київ: Випол, 2004. С. 49-54.
2. Василенко В.А. Сплайн-функции: теория, алгоритмы, программы. Новосибирск: Наука, 1983. 214 с.
3. Лоран П.Ж. Аппроксимация и оптимизация. Москва: Мир, 1975. 496 с.
4. Романовський Г.Ф., Ващиленко М.В., Седько М.П. Основи проектування компресорів суднових ГТД. Миколаїв: НУК, 2008. 292 с.
5. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. Москва: Мир, 1980. 279 с.
6. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. Москва: Машиностроение, 1970. 609 с.
7. Шикин Е.В., Каменецкий М.М. Кривые на плоскости и в пространстве. Москва: Фазис, 1997. 325 с.
8. Anselone P.M., Laurent P.J. 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.
9. Cumpsty N.A. Compressor aerodynamics. Krieger Publishing Company, 2004. 552 p.

---

*Valerii BORISENKO, Oksana KORCHAGINA, Angelika RYABOVA*  
Mykolayiv

**ADAPTATION OF NACA PROFILES OF THE 65<sup>TH</sup> SERIES TO THE MODELING  
OF BLADES OF AXIAL COMPRESSORS OF GAS-TURBINE ENGINE**

*The paper considers the coordination of profiles of compressor blades, which are specified by a certain set of discrete points, with leading and trailing edges. Anselona-Laurent interpolation-approximation splines were used for analytic representation of profile circles. The search for the points of linking of the circles of the leading and trailing edges is realized numerically by solving a transcendental equation constructed as the difference between the angles of inclination of the tangent to the circle of the leading and trailing edge and to the curve given by the Anselon-Loran spline.*

**Keywords:** *NACA profiles of the 65<sup>th</sup> series, geometrical modeling, blade, axial compressor, leading and trailing edges.*

*Валерій БОРИСЕНКО, Оксана КОРЧАГИНА, Анжеліка РЯБОВА*  
Николаев

**АДАПТАЦИЯ ПРОФИЛЕЙ НАСА 65-ОЙ СЕРИИ К МОДЕЛИРОВАНИЮ  
ЛОПАТОК ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*В работе рассматривается вопрос согласования профилей компрессорных лопаток, которые задаются определенной совокупностью дискретных точек, с входными и выходными кромками. Для аналитического представления обводов профилей применены интерполяционно-аппроксимационные сплайны Анселона-Лорана. Поиск точек стыковки окружностей входящей и выходящей кромок реализуется численным методом путем решения трансцендентного уравнения, построенного как разность углов наклона касательных к окружности входящей или выходящей кромки к окружности профиля, представленного сплайном Анселона-Лорана.*

**Ключевые слова:** *профили НАСА 65-ой серии, геометрическое моделирование, лопатка, осевой компрессор, входящая и выходящая кромки.*

Стаття надійшла до редколегії 31.03.2019