

- Борисенко В. Д.** д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського, Миколаїв, Україна, e-mail: borisenko.valery@gmail.com;
- Устенко С. А.** д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського, Миколаїв, Україна, e-mail: ustenko.s.a@gmail.com;
- Устенко І. В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: ustenko.irina@gmail.com

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ S-ПОДІБНИХ СКЕЛЕТНИХ ЛІНІЙ ПРОФІЛІВ ЛОПАТОК ОСЬОВИХ КОМПРЕСОРІВ

Мета роботи. Розробка геометричної моделі S-подібних скелетних (середніх) ліній профілів напрямних і робочих решіток компресорів осьового конструктивного оформлення шляхом подальшого розвитку методу геометричного моделювання S-подібних кривих.

Методи дослідження. Скелетні лінії профілів лопаток осьових компресорів пропонується подавати в натуральній параметризації із застосуванням квадратичної залежності розподілу кривини від довжини дуги. Невідомі коефіцієнти цієї залежності визначаються шляхом мінімізації відхилення проміжно отриманої точки скелетної лінії від точки, заданої проектантом. Об'єктом дослідження є процес моделювання скелетних ліній профілів лопаток осьових компресорів, предметом дослідження – моделі скелетних ліній.

Отримані результати. На основі запропонованого методу геометричного моделювання S-подібних кривих розроблено програмний код, який дозволяє отримувати і візуалізувати на екрані монітора комп'ютера скелетні лінії профілів лопаток в широкому діапазоні кінематичних і геометричних параметрів проєктованих робочих і напрямних решіток осьових компресорів, що підтверджено практичною реалізацією чисельних тестових варіантів змодельованих ліній.

Наукова новизна. Вперше запропоновано метод геометричного моделювання скелетних ліній профілів лопаток осьових компресорів із застосуванням натуральної параметризації та квадратичного закону розподілу кривини від довжини дуги обводу, що забезпечує плавність розподілу кривини та перегин отриманої кривої в заданій користувачем точці.

Практична цінність. Запропонована модель скелетних ліній профілів лопаток осьових компресорів розширює математичне забезпечення автоматизованої системи проєктування лопаткових апаратів проточних частин компресорів осьового типу, знижує імовірність появи огрехів у геометрії об'єктів проєктування та подальшої їх обробки на високоточному технологічному устаткуванні.

Ключові слова: скелетна лінія; профіль лопатки; осьовий компресор; геометричне моделювання; натуральна параметризація; кривина.

ВСТУП

Однією з найбільш складних і наукомістких галузей промисловості, яка динамічно розвивається в Україні та знаходить усе більш широке застосування своїх виробів на національному та міжнародному ринках, є газотурбобудування. Поштовхом до подальшого розвитку цієї енергетичної галузі промисловості є постійне зростання вимог замовників до надійності газотурбінних двигунів (ГТД), їх економічності, безпеки в експлуатації, екологічної чистоти в роботі тощо. Ефективність ГТД суттєво залежить від ступеня геометричної досконалості лопаткових апаратів турбін і, особливо, компресорів – газодинамічних

машин, які дуже чутливо реагують навіть на незначні негаразди в геометрії їх проточних частин. Відомо, що деякі неузгодженості між геометрією лопаток компресорів і течією робочої речовини призводять до появи додаткових втрат енергії, відриву потоку і, навіть, до помпажу. Застосування сучасних інформаційних технологій в плані подання плоских і просторових обводів виробів складної геометричної форми у підсумку сприятиме поліпшенню геометричної якості лопаткових апаратів компресорів, а, отже, підвищенню ефективних показників як компресорів, так і ГТД у цілому, що, в свою чергу, призведе до суттєвої економії паливних ресурсів як двигунів, що зас-

тосовуються в судновій енергетиці, так і тих, що використовуються на газоперекачувальних станціях магістральних газопроводів.

Проектування лопаткових апаратів компресорів сучасних ГТД є складним багатоетапним процесом, ключовою складовою якого є побудова решіток профілів на осесиметричних (зокрема, циліндричних) поверхнях струму в проточних частинах компресорних венців. У випадку циліндричних поверхонь струму побудова решіток профілів виконується на основі рішення задач проектування плоскої компресорної решітки, що забезпечує заданий поворот потоку при мінімальних втратах енергії робочої речовини в решітках.

Традиційно профілі лопаток осьових компресорів формуються шляхом розподілу добре відпрацьованих симетричних або асиметричних профілів вздовж скелетної (середньої) лінії, яка має забезпечувати задані кути входу і виходу потоку, що досягається відповідними кутами нахилу дотичних в початковій і кінцевій точках скелетної лінії. З підвищенням швидкості руху течії робочої речовини, яка у високонавантажених осьових компресорах потужних ГТД сягає дозвукових і, навіть, значних надзвукових величин, проєктанти компресорів почали надавати скелетним лініям *S*-подібну форму, яка сприяє безградієнтному руху ядра робочої речовини на виході із міжпрофільних каналів. Оскільки серед математичних кривих не виявлено таких, які б забезпечували зазначені умови, важливість розв'язання цього питання суттєво зростає.

1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасній літературі з тематики, якій присвячена ця робота, можна знайти достатньо різноманітних методів геометричного моделювання скелетних ліній профілів лопаток осьових компресорів. На ранньому етапі створення осьових компресорів скелетні лінії профілів їх лопаток описували дугами кіл, гіпербол, сполученням дуги кола або гіперболи з відрізком прямої лінії, спряженням двох дуг кіл тощо [6 – 8]. Усі ці методи мають незадовільні графіки розподілу кривини, однієї з важливіших диференціальних характеристик кривих ліній. При поданні скелетної лінії сполученням дуг різних кривих в місці їх спряження відбувається стрибкоподібна зміна кривини, а у випадку сполучення дуг кривих з прямою лінією ситуація погіршується, оскільки кривина прямої дорівнює нулю. Відомі публікації [1, 2], в яких пропонується моделювати криві, у тому числі й *S*-подібні, із застосуванням дуг кіл, поліноміальних та експоненціальних кривих. У роботі [3] досліджуються компресорні решітки з керованою формою скелетної лінії профілю. Автори цієї роботи приходять до висновку, що зни-

ження втрат енергії в осьовому компресорі можна отримати при проектуванні їх решіток з різною формою скелетної лінії, зокрема *S*-подібною. Зазначимо, що останніми роками при моделюванні різноманітних технічних об'єктів набули популярності методи подання кривих у натуральній параметризації.

2 МЕТА РОБОТИ

Метою цієї роботи є розробка нового методу геометричного моделювання скелетних ліній профілів лопаток осьових компресорів із застосуванням натуральної параметризації кривих і квадратичної залежності кривини від довжини дуги модельованої лінії. При цьому необхідно забезпечити можливість шляхом відповідного вибору коефіцієнтів квадратичної залежності кривини кути входу і виходу потоку із решітки профілів, а також наявність перегину модельованої кривої з метою надання їй *S*-подібної форми.

За вихідні дані при моделюванні скелетної лінії приймаються геометричні кути входу і виходу потоку робочої речовини, координати початкової та кінцевої точок модельованої лінії, абсциса точки початку перегину кривої та кут нахилу дотичної в цій точці. Коефіцієнти квадратичної залежності кривини та ордината точки перегину кривої визначаються в процесі моделювання потрібної скелетної лінії. Результатом моделювання виступатимуть координати точок отриманої скелетної лінії, що забезпечує задані кути входу і виходу потоку та наявність перегину кривої на визначеній проєктантом її відстані від фронту решітки профілів.

3 ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЕЛЕТНОЇ ЛІНІЇ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розглянемо моделювання скелетної лінії профілю лопатки осьового компресора, яка генеруються в натуральній параметризації та кривина якої підпорядковується квадратичній залежності від довжини дуги обводу, взятому у вигляді:

$$k(s) = as^2 + bs + c, \quad (1)$$

де k кривина кривої; a , b , c – коефіцієнти, які підлягають визначенню при моделюванні кривої; s – поточна довжина дуги кривої.

З диференціальної геометрії [5] відомо, що приріст кута нахилу дотичної $d\varphi$ до осі x дорівнює добутку кривини кривої $k(s)$ на диференціал дуги ds , тобто

$$d\varphi = k(s)ds.$$

З цього виразу інтегруванням можна знайти кут нахилу дотичної до кривої в довільній її точці:

$$\varphi(s) = \varphi(0) + \int_0^s k(s) ds.$$

За прийнятим законом розподілу кривини (1) кут нахилу дотичної до моделюваної кривої визначається виразом:

$$\varphi(s) = \varphi_0 + \frac{as^3}{3} + \frac{bs^2}{2} + cs. \quad (2)$$

Параметричну криву в натуральній параметризації можна описати наступними рівняннями:

$$x(s) = x_0 + \int_0^s \cos \varphi(s) ds; \quad (3)$$

$$y(s) = y_0 + \int_0^s \sin \varphi(s) ds. \quad (4)$$

При моделюванні скелетних ліній застосуємо такі вихідні дані:

$$\text{точка } 0 \rightarrow x = 0, \quad y = 0, \quad y' = \operatorname{tg} \varphi_0;$$

$$\text{точка } 1 \rightarrow x = x_p, \quad y' = \operatorname{tg} \varphi_1;$$

$$\text{точка } 2 \rightarrow x = x_2, \quad y = y_2, \quad y' = \operatorname{tg} \varphi_2,$$

де $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ – кути нахилу дотичних до моделюваної кривої.

У графічному вигляді вихідні дані показані на рис. 1. Їх зміст ясний і зрозумілий.

Зазначимо, що моделювання скелетної лінії профілю компресорної лопатки виконується у відносних координатах, в яких абсциса x змінюватиметься у межах від 0 до 1. Щодо ординати точки 2 можна відмітити, що її величина визначається виходячи із прийнятого закону закручення лопатки, заданого кута установки профілю в решітці. Кути φ_0 і φ_2 асоціюються з кутами входу і виходу потоку робочої речовини, вони, а також кут φ_1 , задаються проектантом компресора на базі проведених газодинамічних розрахунків.

Моделювання скелетної лінії виконується в наступній послідовності. Спочатку на підставі залежності (2) встановлюється зв'язок між кутом в початковій точці кривої, тобто кутом і заданими кутами φ_2 і φ_1 :

$$\varphi_2 = \varphi_0 + \frac{aS^3}{3} + \frac{bS^2}{2} + cS;$$

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \frac{apS^3}{3} + \frac{bpS^2}{2} + cpS,$$

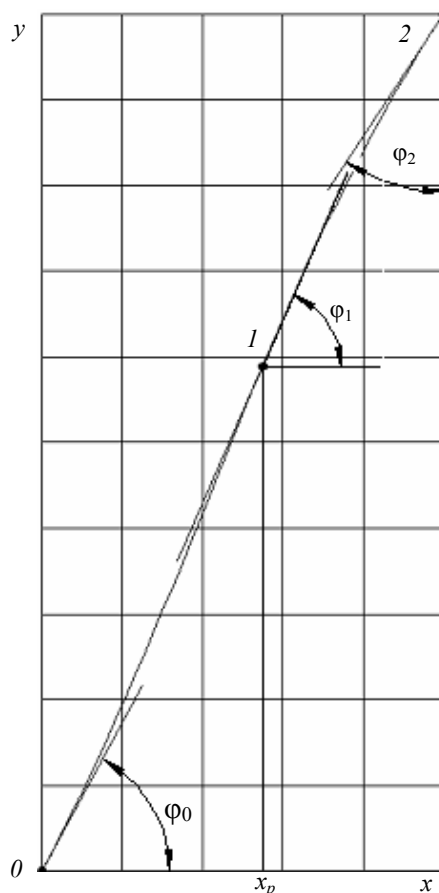


Рисунок 1. Вихідні дані до моделювання скелетних ліній

де S – довжина дуги кривої; p – деяка її частка, яка забезпечує проходження кривої через точку 1.

З цих виразів знаходимо залежності для визначення коефіцієнту a :

$$a = \frac{3}{S^3} \left(\varphi_2 - \varphi_0 - \frac{bS^2}{2} - cS \right);$$

$$a = \frac{3}{p^3 S^3} \left(\varphi_1 - \varphi_0 - \frac{bp^2 S^2}{2} - cpS \right).$$

Оскільки точки 1 і 2 належать одній і тій самій кривій, то можна ці коефіцієнти прирівняти і знайти вираз для коефіцієнта c :

$$c = \frac{\varphi_2 - \varphi_0 - p^2(\varphi_1 - \varphi_0)}{Sp(1 - p^2)} - \frac{bSp}{2(1 + p)}.$$

Для побудови скелетної лінії треба якимось чином визначити значення трьох невідомих коефіцієнтів (a, b, c), довжину дуги обводу S та частку p , яка визначає довжину дуги між точками 0 і 1

1. Отже, в поставленій задачі п'ять невідомих. Завдяки наявності кутів нахилу дотичних до моделюваної кривої були знайдені вирази для обчислення коефіцієнтів a і c . Розглянувши вираз для коефіцієнта c , можна побачити, що для його розрахунку треба мати числові значення коефіцієнтів b і p та довжину дуги S . Тобто кількість невідомих зменшилася до трьох. Для їх знаходження маємо координати точки 2 та абсцису точки 1. Таким чином, кількість невідомих збігається з кількістю наявних рівнянь вигляду (3) і (4), застосованих для координат x і y точки 2 та абсциси x точки 1.

Ці невідомі будемо визначати шляхом розв'язання оптимізаційної задачі, пов'язаної з узгодженням проміжно отриманої кінцевої точки скелетної лінії та ординати y точки 1 з заданою кінцевою точкою.

За цільову функцію в оптимізаційній задачі приймається вираз:

$$\Delta = \sqrt{(\bar{x} - x_2)^2 + (\bar{y} - y_2)^2} + |\hat{x} - x_1|,$$

де \bar{x} , \bar{y} , \hat{x} – координати проміжних точок, визначених з деякими значеннями невідомих параметрів.

Безпосередньо для розв'язання оптимізаційної задачі застосовано високоефективний алгоритм, призначений для мінімізації функції багатьох змінних, запропонований Хуком-Дживсом [10].

Оскільки в задачі, яка розв'язується, існують два критерії, бо крива, яка вийшла з точки 0 має пройти спочатку через точку 1, для якої відома тільки абсциса, а потім через точку 2, то вона відноситься до класу багатоцільових задач. У цій роботі для її розв'язання застосовано метод Гермейера [4], який передбачає використання для цільової функції (у нашому випадку існують дві цільові функції Δ_i) єдиного показника Q , в якому цим складовим приписують різну вагу λ_i , пронормовану на 1. Тобто,

$$Q = \sum \lambda_i \Delta_i, \\ \sum \lambda_i = 1.$$

Таким чином, цільова функція набуде вигляду:

$$\Delta = \lambda_1 \sqrt{(\bar{x} - x_2)^2 + (\bar{y} - y_2)^2} + \lambda_2 |\hat{x} - x_1|.$$

У цій роботі всі наведені нижче результати були отримані при $\lambda_1 = 0,75$ і $\lambda_2 = 0,25$. При цьому похибка визначення цільової функції не перевищувала $1,05E-4$, що є достатнім для практичного застосування, оскільки сучасне техноло-

гічне обладнання дозволяє обробляти лопатки з допуском $0,03...0,05$ мм.

На підставі запропонованого методу моделювання скелетних ліній профілів лопаток осевих компресорів розроблено програмний код, застосування якого дозволяє проводити обчислювальний експеримент з візуалізацією отриманих графічних результатів.

При проведенні обчислювальних експериментів отримані результати, які наведені нижче у графічному вигляді.

Так, на рис. 2 показані результати моделювання трьох скелетних ліній. Всі вони моделювалися з однаковими вихідними даними, за винятком ординати кінцевої точки, яка зменшувалася від 2,0 до 1,8 з кроком 0,1. Маленькі кола на цьому рисунку відповідають початковим і кінцевим точкам скелетних ліній, а також точкам, де відбувається перегин кривих. Зі зменшенням ординати кінцевої точки відповідно зменшується ордината точки перегину. Оскільки абсциса цих точок не змінювалася, то всі точки перегину чітко знаходяться на одній вертикальній лінії. Зрозуміло, що вихідні дані взяті для умовної решітки профілів лопаток осевих компресорів. Метою цих і нижче наведених результатів є перевірка працездатності запропонованого методу моделювання об'єкту дослідження.

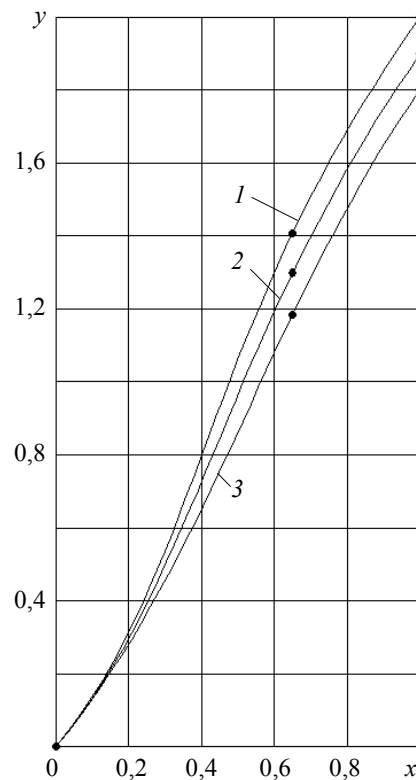


Рисунок 2. Вплив ординати кінцевої точки на S-подібні криві

Додаткову інформацію щодо плідності запропонованого методу моделювання скелетних ліній можна отримати, розглянувши графічну інформацію, наведену на рис. 3, де показані криві розподілу кривини скелетних ліній від відносної їх довжини тих кривих, які зображені на рис. 2. Нумерація кривих на цих рисунках є узгодженою. Криві кривини мають плавний характер. Вони поступово змінюються від монотонно спадної кривої (крива 1) до кривої з яскраво вираженим екстремумом (крива 3).

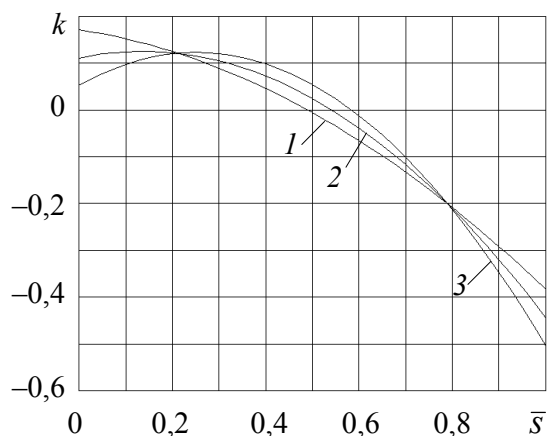


Рисунок 3. Графіки залежності кривини від відносної довжини дуги

Вплив кутів φ_0 і φ_2 при сталих значеннях координати x_p і кута φ_1 на S -подібні криві продемонстровано на рис. 4. Треба відзначити, що при цих розрахунках ордината кінцевих точок зменшена до 1,2. Це можна вважати наслідком зміни кута установки профілів лопаток осьових компресорів. У цих розрахунках кут φ_0 зростає від $67,5^\circ$ до $77,5^\circ$ з кроком 5° , кут φ_2 також зростає у межах від 40° до 50° з кроком 5° . Точки на кривих, як і вище, визначають початок перегину цих кривих.

Кут також впливає на S -подібні криві (рис.5). На цьому рисунку криві моделювалися з поступовим зростанням кута від 25° (верхня крива) до 35° (нижня крива) з кроком 5° .

Зрозуміло, що за наявності працездатної програми можна навести значно більше прикладів, які демонструють вплив тих чи інших параметрів на модельовані криві. Усі наведені результати мають чисто ілюстративний характер. Накопичений досвід свідчить, що до вибору вихідних даних треба підходити зважено. Це, до речі, також відноситься до всіх кривих, які застосовуються при поданні скелетних ліній профілів лопаток осьових компресорів.

Наведені вище результати моделювання підтверджують можливість побудови скелетних

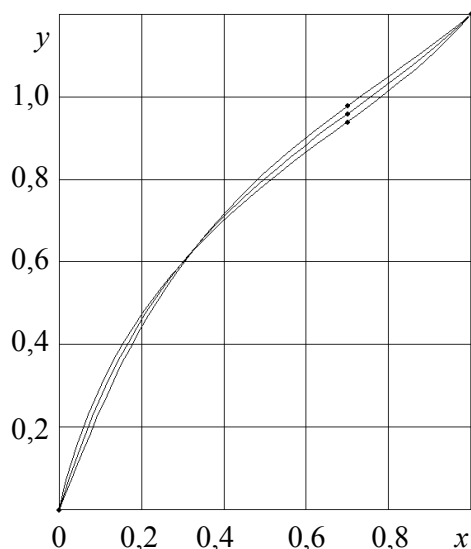


Рисунок 4. Вплив кутів φ_0 і φ_2 на S -подібні криві

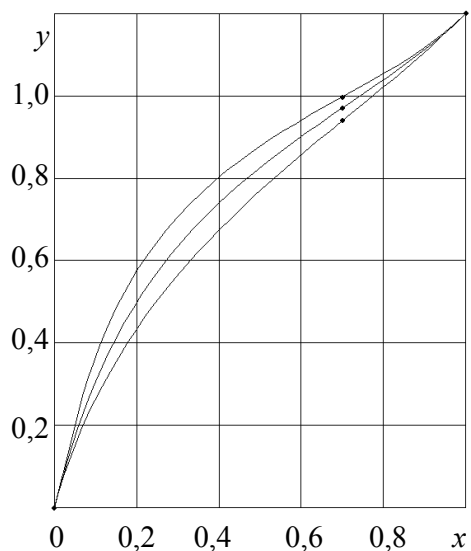


Рисунок 5. Вплив кута φ_1 на S -подібні криві

ліній S -подібної форми на базі кривих, що подаються у натуральній параметризації, та квадратичних залежностях розподілу кривини від довжини дуги.

Слід підкреслити, що отримані в роботі результати мають не тільки теоретичний, але й практичний інтерес. Вони комплексно реалізують процес геометричного моделювання S -подібних скелетних ліній профілів лопаток осьових компресорів, що суттєво ускладнено при застосуванні традиційних підходів до побудови розглянутих в роботі кривих. Проектанту компресорної решітки профілів надана можливість безпосередньо впливати на розташування точки перегину кривої. На підставі газодинамічних роз-

рахунків потоку робочої речовини можна визначити доцільне положення точки перегину, яке забезпечить безградієнтну течію у вихідній частині решітки профілів і зменшить втрати енергії в компресорі.

Подальші дослідження у сфері моделювання профілів лопаток компресорних решіток мають бути спрямовані на розташування вздовж побудованої *S*-подібної кривої добре відпрацьованих експериментальним шляхом симетричних або асиметричних крилових профілів, що є загальноприйнятим у практиці розробки проектів осевих компресорів ГТД.

ВИСНОВКИ

Запропоновано новий метод геометричного моделювання скелетних профілів лопаток компресорних решіток *S*-подібної форми, який базується на застосуванні кривих в натуральній параметризації та квадратичної залежності розподілу кривини, невідомі коефіцієнти якої визначаються в процесі моделювання потрібної лінії. При цьому проєктант компресорної решітки має можливість впливати на розташування точки перегину кривої для надання їй *S*-подібної форми та задавати в цій точці кут нахилу дотичної.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1]. Борисенко В. Д. Геометричне моделювання дволанкових *s*-подібних кривих [Electronic resource] / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко, Є. І. Друзь // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016. – Вип. 6, Т. 2. – С. 14–21. Режим доступу <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/e-index.ht>

[2]. Борисенко В. Д. Метод аналітичного подання скелетних ліній профілів лопаток осевих компресорів / В. Д. Борисенко, Є. І. Друзь //

Прикладна геометрія та інформаційні технології в моделюванні об'єктів, явищ і процесів: Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції. – Миколаїв: МНУ імені В.О. Сухомлинського, 2016. – С. 55–58.

[3]. Исследование компрессорных решеток с управляемой формой средней линии профиля / В.С. Бекнев, С. Е. Василенко, М. Ю. Сороколетов и др. // Теплоэнергетика, 1997. – № 4. – С. 38–42.

[4]. Кини Р.П. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения [Текст] / Р.П. Кини, Х. Райха. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

[5]. Рашевский П. К. Курс дифференциальной геометрии / П. К. Рашевский. – М.-Л. : ГИТТЛ, 1950. – 428 с.

[6]. Романовський Г. Ф. Основи проєктування компресорів суднових ГТД / Г. Ф. Романовський, М. В. Ващиленко, М. П. Седько. – Миколаїв: НУК, 2008. – 292 с.

[7]. Холщевников К. В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст] / К.В. Холщевников. – М.: Машиностроение, 1970. – 609 с.

[8]. Cumpsty N.A. Compressor aerodynamics / N. A. Cumpsty. – Krieger Publishing Company, 2004. – 552 p.

[9.] Development of advanced compressor airfoils for heavy-duty gas turbines. Part 1. Design and optimization / U. Küller, R. Munig, B. Kysters, H.-A. Schreiber // Transaction of the ASME: Journal of Turbomachinery. – 2000. – Vol. 122. – № 3. – P. 397–405.

[10]. Hooke R. Direct search solution of numerical and statistical problems / R. Hooke, T. A. Jeeves // Journal of the ACM. – 1961. – Vol. 8, № 2. – P. 212–229.

Статья поступила в редакцию 26.03.2018

Борисенко В. Д.

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры компьютерной инженерии Николаевского национального университета имени В. А. Сухомлинского, Николаев, Украина, e-mail: borisenko.valery@gmail.com;

Устенко С. А.

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерной инженерии Николаевского национального университета имени В. А. Сухомлинского, Николаев, Украина, e-mail: ustenko.s.a@gmail.com;

Устенко И. В.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения автоматизированных систем Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: ustenko.irina@gmail.com

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ S-ОБРАЗНЫХ СКЕЛЕТНЫХ ЛИНИЙ ПРОФИЛЕЙ ЛОПАТОК ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

Цель работы. Разработка геометрической модели *S*-образных скелетных (средних) линий профилей направляющих и рабочих решеток компрессоров осевого конструктивного оформления путем дальнейшего развития метода геометрического моделирования *S*-образных кривых.

Методы исследования. Скелетные линии профилей лопаток осевых компрессоров предлагается описывать в натуральной параметризации с применением квадратичной зависимости распределения кривизны от длины дуги. Неизвестные коэффициенты этой зависимости определяются путем минимизации отклонения промежуточно полученной точки скелетной линии от точки, заданной проектантом. Объектом исследования является процесс моделирования скелетных линий профилей лопаток осевых компрессоров, предметом исследования – модели скелетных линий.

Полученные результаты. На основании предложенного метода геометрического моделирования S-образных кривых разработан программный код, позволяющий получать и визуализировать на экране монитора компьютера скелетные линии профилей лопаток в широком диапазоне кинематических и геометрических параметров проектируемых рабочих и направляющих решеток осевых компрессоров, что подтверждено практической реализацией многочисленных тестовых вариантов смоделированных линий.

Научная новизна. Впервые предложен метод геометрического моделирования скелетных линий профилей лопаток осевых компрессоров с применением натуральной параметризации и квадратичного закона распределения кривизны от длины дуги кривой, что обеспечивает плавность распределения кривизны и перегиб полученной кривой в заданной пользователем точке.

Практическая ценность. Предложенная модель скелетных линий профилей лопаток осевых компрессоров расширяет математическое обеспечение автоматизированной системы проектирования лопаточных аппаратов проточных частей компрессоров осевого типа, снижает вероятность появления погрешностей в геометрии объектов проектирования и последующей их обработки на высокоточном технологическом оборудовании.

Ключевые слова: скелетная линия; профиль лопатки; осевой компрессор; геометрическое моделирование; натуральная параметризация; кривизна.

Borisenko V. D. Dr. Sc., Professor of Computer Engineering Department of V.O. Sukhomlynsky National University, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: borisenko.valery@gmail.com;

Ustenko S. A. Dr. Sc., Associate Professor, Head of Computer Engineering Department of V.O. Sukhomlynsky National University, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: ustenko.s.a@gmail.com;

Ustenko I. V. PhD, Associate Professor of Software of the Automated Systems Department of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: ustenko.irina@gmail.com

GEOMETRIC MODELLING OF S-SHAPED SKELETAL LINES PROFILE OF AXIAL COMPRESSOR BLADES

Purpose. Development of the geometric model of S-shaped skeletal (middle) lines of profiles of guide vane and rotor blade cascades of the axial-type compressors by further development of the method of geometric modeling of S-shaped curves.

Research methods. The skeletal lines of the profiles of the axial compressor blades are proposed to be described in natural parametrization using the quadratic dependence of the curvature distribution on the arc length. The unknown coefficients of this dependence are determined by minimizing the deviation of the intermediately obtained point of the skeletal line from the point specified by the designer. The object of the study is the process of modeling the skeletal lines of profiles of axial compressor blades, the subject of research is the model of skeletal lines.

Results. On the basis of the proposed method of geometric modeling of S-shaped curves, a program code has been developed that allows to obtain and visualize on the screen of the computer monitor the skeletal lines of the blade profiles in a wide range of kinematic and geometric parameters of the designed guide vane and rotor blade cascades of the axial compressors. This is confirmed by the practical implementation of numerous test variants of modeled lines.

Scientific novelty. For the first time, a method is proposed for geometric modeling of skeletal lines of profiles of axial compressor blades with the use of natural parametrization and a quadratic law of the distribution of curvature from the arc length of the curve, which ensures the smoothness of the curvature distribution and the kink of the resulting curve at a user-specified point.

Practical value. The proposed model of skeletal lines of profiles of axial compressor blades widens the mathematical support of the automated system for designing shoulder blades of flowing parts of axial-type compressors, reduces the likelihood of errors in the geometry of design objects and their subsequent processing on high-precision technological equipment.

Key words: skeletal line; blade profile; axial compressor; geometric modeling; natural parametrization; curvature.

REFERENCES

- [1]. Borysenko V. D., Ustenko S. A., Druz Ye. I. (2016). Heometrychno modelyuvannya dvolankovykh s-podibnykh kryvykh. *Naukovyy visnyk Tavriyskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu*. Melitopol: T DATU, Vyp. 6 (2), 14–21. Rezhym dostupu <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/e-index.ht>
- [2]. Borysenko V. D., Druz Ye. I. (2016). Metod analitychnoho podannya skeletnykh liniy profiliv lopatok osovykh kompresoriv. *Prykladna heometriya ta informatsiyni tekhnolohiyi v modelyuvanni obyektiv, yavyshch i protsesiv: Materialy vseukrayinskoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi*. Mykolayiv: MNU imeni V.O. Sukhomlynskoho, 55–58.
- [3]. Beknev V. S., Vasilenko S. Ye., Sorokoletov M. YU. (1997). Issledovaniye kompressornykh reshetok s upravlyayemoy formoy sredney linii profilya. *Teplotenergetika*, 4, 38–42.
- [4]. Kini R. P., Raykha K. H. (1981). *Prinyatiye resheniy pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya*. Moscow: Radio i svyaz', 560.
- [5]. Rashevskiy A. V. (1950). *Kurs differentsial'noy geometrii*. Moscow-Leningrad, GONTI, 428.
- [6]. Romanovskiy G. F., Vashchilenko M. V., Sed'ko M. P. (2008). *Osnovy proyektirovaniya kompressorov sudovykh GTD*. Nikolayev: NUK, 292.
- [7]. Kholshchevnikov K. V. (1970). *Teoriya i raschet aviatsionnykh lopatochnykh mashin*. Moscow: Mashinostroyeniye, 609.
- [8]. Cumpsty N. A. (2004). *Compressor aerodynamics*. Krieger Publishing Company, 552.
- [9]. Küller U., Münnig R., Kisters B., Schreiber H. A. (2000). Development of advanced compressor airfoils for heavy-duty gas turbines. Part 1. Design and optimization. *Transaction of the ASME: Journal of Turbomachinery*, 122(3), 397–405.
- [10]. Hooke R., Jeeves T. A. (1961). Direct search solution of numerical and statistical problems. *Journal of the ACM*, 8(2), 212–229.