

УДК 621.125

Валерій БОРИСЕНКО

borisenko.valery@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0857-0708

Андрій УСТЕНКО

austenko0@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0546-7019

Євгеній ДРУЗЬ

ORCID: 0000-0002-9508-4045

м. Миколаїв

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРИДІОНАЛЬНИХ ГРАНИЦЬ ПРОТОЧНИХ ЧАСТИН ОСЬОВИХ КОМПРЕСОРІВ

В статті пропонується метод геометричного моделювання меридіональних границь проточних частин компресорів осьового типу із застосуванням кривих, які подаються у натуральній параметризації та з лінійним законом розподілу кривини від довжини дуги. Задача розв'язується за умови, що відомі координати двох вихідних точок, розташованих на вході та виході з проточної частини компресора, а також кути нахилу до них дотичних. Невідомі коефіцієнти лінійного закону розподілу кривини та довжина дуги обводу визначаються шляхом мінімізації відхилення проміжно отриманих в оптимізаційному процесі точок від вихідних заданих точок. Розроблено програмний код, який дозволяє будувати меридіональні обводи та візуалізувати їх на моніторі комп'ютера.

Ключові слова: геометричне моделювання, меридіональні границі, проточна частина, осьовий компресор, лінійна залежність розподілу кривини, довжина дуги.

Постановка проблеми

Ефективні показники газотурбінних двигунів (ГТД) у значній мірі залежать від ступеня геометричної досконалості проточних частин турбін і, особливо, компресорів – газодинамічних машин, які дуже чутливо реагують навіть на незначні негаразди в геометрії їх нерухомих і рухомих лопаткових апаратів. Загально відомо, що деякі неузгодженості між геометрією проточних частин компресорів і течією робочої речовини призводять до появи додаткових втрат енергії, відриву потоку і, навіть, до помпажу, негативним впливом якого може бути руйнування компресора.

Застосування сучасних інформаційних технологій в сфері аналітичного подання обводів профілів лопаток і меридіональних перерізів 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 двигунів, які застосовуються в судновій та промисловій енергетиці, зокрема, тих, що використовуються на газоперекачувальних станціях магістральних газопроводів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасній літературі з прикладної геометрії можна знайти достатньо робіт, в яких розглядаються питання моделювання кривих із застосуванням їх натуральних рівнянь [1-4, 9]. Це свідчить про зацікавленість науковців досліджувати криві в натуральній параметризації. У більш концентрованому вигляді це питання розглянуто в роботі [2], автори якої не тільки виклали теоретичні основи моделювання плоских і просторових кривих, але й навели приклади практичного застосування розроблених ними методів моделювання кривих, які відповідають заданим умовам побудови обводів

технологічно складних галузей промисловості. У той же час можна відзначити, що в літературі з компресорної тематики [5-7] майже відсутні чіткі рекомендації щодо побудови меридіональних границь осьових компресорів ГТД. У світлі викладеного можна вважати, що розробка методу побудови меридіональних границь осьових компресорів є актуальною.

Постановка завдання

Здійснити моделювання меридіональних границь проточних частин компресорів осьового типу за умови, що відомі координати початкової та кінцевої точок границь, а також кути нахилу в них дотичних. Поставлене завдання розв'язувати із застосуванням кривих, які описуються у натуральній параметризації та базуються на лінійному законі розподілу кривини від довжини дуги.

Виклад основного матеріалу

При проектуванні компресорів ГТД виконуються їх габаритний та газодинамічний розрахунки. На стадії габаритного розрахунку визначаються радіальні та осьові розміри компресора, оцінюється кількість ступенів, частота обертання ротору, габарити входних та вихідних пристроїв

тощо. У підсумку це дозволяє побудувати меридіональний переріз його проточної частини, що надає можливість для заданих умов проектування визначати геометричні розміри напрямних і робочих лопаток.

На рис. 1 у спрощеному вигляді показані три схеми проточних частин осьових компресорів: з постійними діаметром корпусу, середнім діаметром та діаметром втулки. Саме ці схеми проточних частин широко застосовуються в конструкціях сучасних ГТД. На цьому рисунку літерою D позначено діаметр, літерою l – довжини лопаток; індекси «к», «вт», «сер» відповідають корпусу проточної частини, втулці та середньому діаметру, а «вх», «вих» – перерізам на вході та на виході із компресора.

Кожній із наведених схем притаманні певні переваги та недоліки. Не зупиняючись на особливостях цих схем, зазначимо, що метою цієї роботи є розробка методу аналітичного подання криволінійних ділянок меридіональних границь осьових компресорів із застосуванням кривих, які описуються в натуральній параметризації. Таким чином, передбачається, що кривина кривої функціонально залежить від довжини власної дуги.

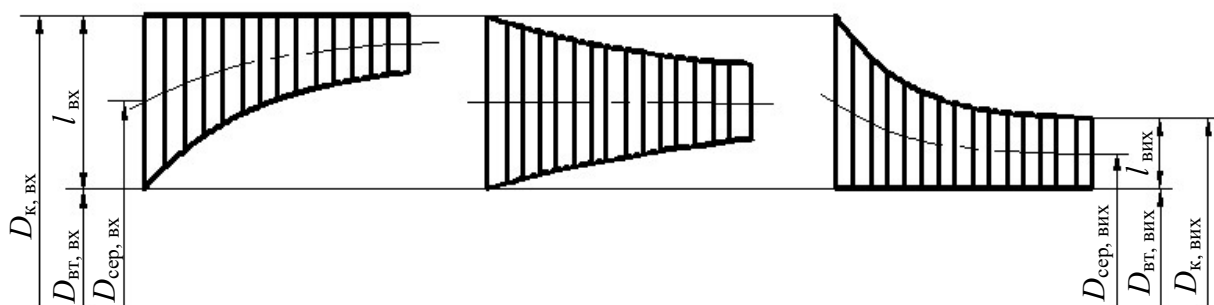


Рис. 1. Схеми проточних частин осьових компресорів

За вихідні дані при моделюванні меридіональної границі компресора приймаються координати її кінцевих точок та кути нахилу в них дотичних. Згідно з [2] цих даних достатньо для аналітичного подання моделюваної меридіональної границі із застосуванням лінійного закону розподілу кривини, який записується у наступному вигляді

$$k = as + b,$$

де k – кривина кривої; s – довжина дуги; a і b – невідомі коефіцієнти, які разом з довжиною дуги S визначаються в процесі моделювання меридіональної границі проточної частини осьового компресора.

У задачі, яка розв'язується, є три невідомі величини, це коефіцієнти закону роз-

поділу кривини a і b та довжина дуги кривої S . Застосовуючи положення диференціальної геометрії, зменшуємо кількість невідомих завдяки взаємозв'язку кутів нахилу дотичних до меридіональної границі проточної частини в її кінцевих точках.

Так, лінійному розподілу кривини відповідає наступна залежність кута нахилу дотичної до кривої від довжини дуги обводу:

$$\varphi(s) = \varphi_{\text{вх}} + \frac{as^2}{2} + bs, \quad (1)$$

де $\varphi_{\text{вх}}$ – кут нахилу дотичної до кривої в початковій точці.

За умови, що відомий кут нахилу дотичної в кінцевій точці меридіонального обводу проточної частини осьового компресора, можна з виразу (1) знайти залежність коефіцієнта a від довжини дуги кривої S в кінцевій точці, коефіцієнта b та кутів $\varphi_{\text{вх}}$ і $\varphi_{\text{вих}}$:

$$a = \frac{2}{S} \left(\frac{\varphi_{\text{вих}} - \varphi_{\text{вх}}}{S} - b \right).$$

Для визначення решти невідомих застосуємо два рівняння, які дозволяють розрахувати координати кінцевої точки. Вони мають вигляд:

$$\begin{aligned} x_{\text{вих}} &= x_{\text{вх}} + \int_0^S \cos \varphi(s) ds; \\ y_{\text{вих}} &= y_{\text{вх}} + \int_0^S \sin \varphi(s) ds. \end{aligned} \quad (2)$$

Маючи ці два рівняння, можна, задавшись якимось чином коефіцієнтом b і довжиною дуги S , розрахувати координати деякої умовно кінцевої точки, яка, зрозуміло, не буде збігатися із заданою кінцевою точкою. Пошуку невідомих можна надати цілеспрямований характер, застосувавши процедуру мінімізації. Дві інші невідомі знаходяться шляхом розв'язання задачі мінімізації відхилення проміжно отриманої кінцевої точки кривої (при деяких значеннях невідомого коефіцієнта b і довжини дуги S) від її заданого з вихідними даними значення.

Для розв'язання оптимізаційної задачі був застосований високоефективний алгоритм мінімізації функції багатьох змінних, започаткований в роботі [8].

На підставі запропонованого методу геометричного моделювання меридіональних границь осьового компресора розроблено програмний код, який дозволяє як проводити відповідні розрахунки, так і візуалізувати на екрані комп'ютера отримані результати.

Результати розв'язання тестових задач наведені на рис. 2. Вони демонструють вплив кожного з п'яти варійованих параметрів (довжин лопаток на вході та на виході з компресора, довжини проточної частини, кутів нахилу дотичних в кінцевих точках кривих) на форму меридіональних границь проточних частин осьових компресорів. Для кожного варійованого параметра будувалося по три кривих.

Для проведення тестових розрахунків була обрана схема проточної частини компресора зі сталим значенням середнього діаметра, оскільки цій схемі притаманні криволінійні форми обох меридіональних границь. Хоча і в цьому випадку схеми проточної частини достатньо моделювати тільки одну границю, а іншу отримувати симетричним відображенням відносно лінії, яка проходить через середні значення довжин лопаток.

Зазначимо, що всі приклади моделювання виконані із застосуванням відносних значень лінійних геометричних параметрів.

Графічна інформація, наведена на рис. 2, a , демонструє вплив довжини лопатки на виході із компресора. Ця довжина зменшувалася від значення 0,04 до величини 0,03 з кроком 0,005. Позначення довжин лопаток на рисунку не виконувалися, оскільки вони очевидні.

Як впливає з розгляду цього рисунку, три криві при переміщенні від виходу до входу поступово зливаються в одну криву, що є наслідком сталості всіх інших параметрів і, в першу чергу, довжини лопатки на вході в компресор.

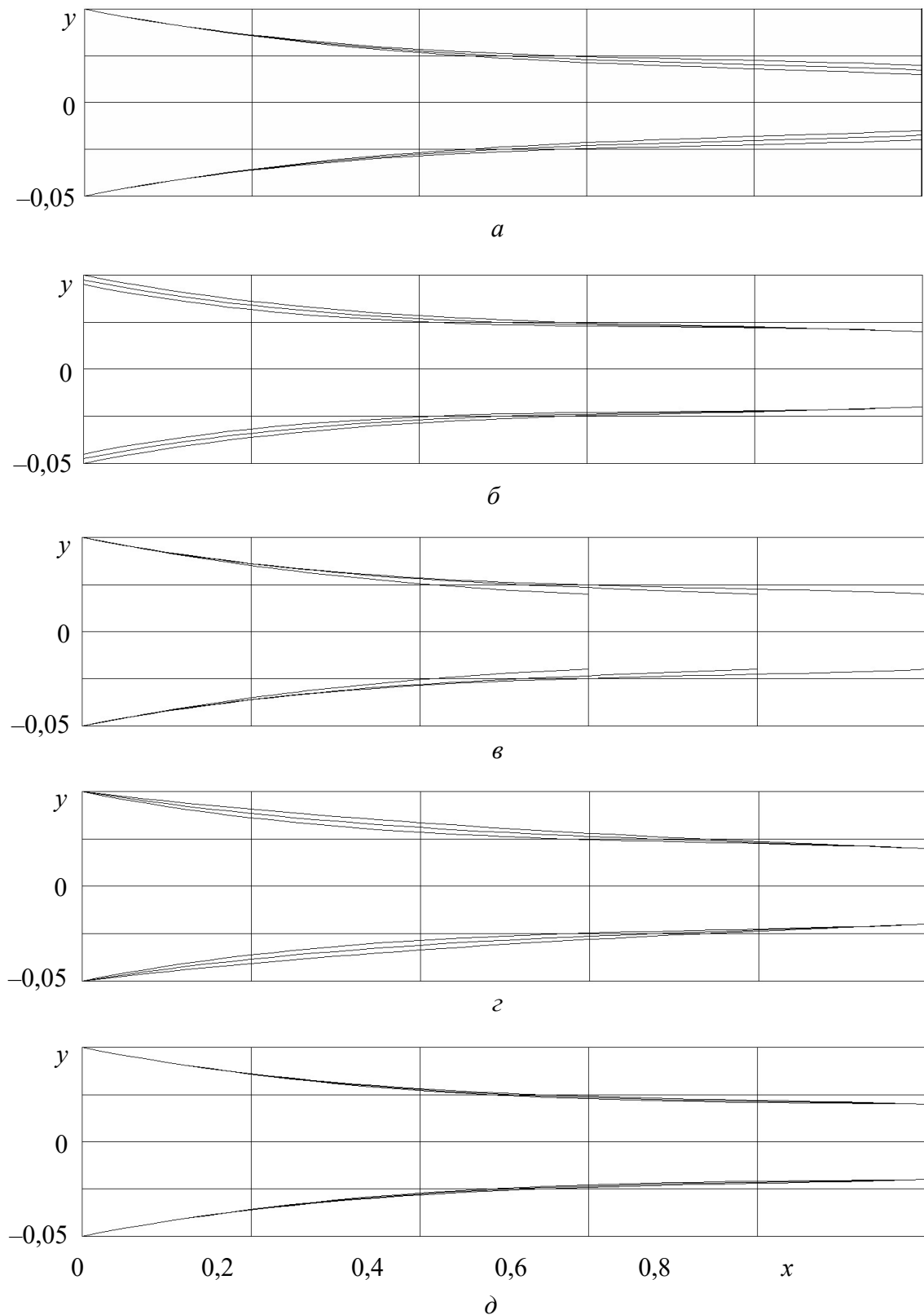


Рис. 2. Результати моделювання меридіональних границь компресорів

На рис. 2, б продемонстровано вплив довжини лопатки на вході в компресор, яка зменшувалася у відносному вигляді від 0,1 до 0,09 з кроком 0,005. При цих розрахунках всі інші параметри були такими ж, як і при моделюванні кривих, показаних на рис. 2, а. Довжина лопатки на виході з компресора дорівнювала 0,04. Як і у попередньому випадку, три криві поступово зливаються в одну єдину криву, але тепер на виході із компресора.

Вплив довжини проточної частини на форму меридіональних границь компресора можна побачити на рис. 2, в. У відповідних розрахунках довжина проточної частини зменшувалася від значення 1,0 до величини 0,6 з кроком 0,2.

Рис. 2, г демонструє вплив кута нахилу дотичної на вході в компресор на його меридіональні границі. Верхня з трьох поданих кривих мала кут нахилу дотичної, який дорівнював -6° . Для інших кривих цей кут поступово зменшувався до -10° з кроком у два градуси.

Відносно впливу кута нахилу дотичної на виході із компресора, який продемонстровано на рис. 2, д, можна відмітити, що три криві практично не відрізняються одна від одної. Це є наслідком того, що вказаний кут варіювався у дуже вузькому діапазоні, зокрема, від $0,5^\circ$ до $1,5^\circ$ з кроком $0,5^\circ$. На рис. 2, д цей факт проявляється у незначному потовщенні кривої в середній частині проточної частини компресора. Такий вузький діапазон варіювання кута

нахилу дотичної на виході із компресора пояснюється бажанням, по-перше, забезпечити поступове зменшення довжин лопаток у вихідній ділянці проточної частини, по-друге, не змінювати значення всіх інших параметрів, вплив яких розглядався вище.

Зазначимо, вся графічна інформація, наведена на рис. 2, є результатом візуалізації кривих, отриманих спеціально розробленим програмним кодом, реалізованим в середовищі Fortran Power Station. Ця інформація є скріншотами екранних рисунків, тому на побудованих кривих проявляється деяка ступінчастість, яка притаманна растровій графіці.

Висновки і перспективи досліджень

Практична реалізація запропонованого методу геометричного моделювання меридіональних границь проточних частин осьових компресорів із застосуванням кривих, які подаються у натуральній параметризації з лінійним законом розподілу кривини, підтвердила його працездатність. Плідною виявилася ідея визначення невідомих коефіцієнтів законів розподілу кривини шляхом мінімізації відхилення вихідних точок від проміжно отриманих їх аналогів при розв'язанні оптимізаційної задачі. Подальші зусилля в сфері цих досліджень мають бути спрямовані на їх впровадження на підприємствах відповідної галузі промисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анпілогова, В.О. Моделювання кривих ліній за допомогою управляючих ламаних, що визначають їх натуральні рівняння [Текст] / В.О. Анпілогова, С.І. Ботвіновська, А.Г. Анпілогов. // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КДТУБА, 2003. – Вип. 72. – С. 124-129.
2. Борисенко, В.Д. Геометричне моделювання кривих ліній і поверхонь у натуральній параметризації [Текст] / В.Д. Борисенко, С.А. Устенко, І.В. Устенко. – Миколаїв: МНУ, 2018. – 220 с.
3. Легета, Я.П. Опис та побудова замкнутої кривої за її натуральними рівняннями [Текст] / Я.П. Легета // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА, 2011. – Вип. 88. – С. 219-228.
4. Пилипака, С.Ф. Графо-аналитический метод приближенного построения кривой по заданному натуральному уравнению [Текст] / С.Ф. Пилипака // Прикладная геометрия и инженерная графика. – К.: Будівельник, 1989. – Вып. 48. – С. 44-45.

5. Романовський, Г.Ф. Основи проектування компресорів суднових ГТД [Текст] / Г.Ф. Романовський, М.В. Ващиленко, М.П. Седько. – Миколаїв: НУК, 2008. – 292 с.
6. Холщевников, К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст] / К.В. Холщевников. – М.: Машиностроение, 1970. – 609 с.
7. Cumpsty, N.A. Compressor aerodynamics [Text] / N.A. Cumpsty. – Krieger Publishing Company, 2004. – 552 p.
8. Hooke, R. Direct search solution of numerical and statistical problems [Text] / R. Hooke, T.A. Jeeves // Journal of the ACM. – 1961. – Vol. 8, No 2. – P. 212-229.
9. Pal, T.K. Two-dimensional curve synthesis using liner curvature elements [Text] / T.K. Pal, A.W. Nutbourne // Computer Aided Design. – 1977. – Vol. 9, No 2. – P. 77-84.

Valerii BORISENKO, Andrii USTENKO, Yevheniy DRUZ
Mykolayiv

GEOMETRIC MODELLING OF THE MERIDIOANAL BOUNDARIES OF THE FLOW PARTIES OF THE AXIAL COMPRESSORS

The article proposes a method of geometric modelling of the meridional boundaries of the flow parts of the axial type compressors using the curves given in the natural parameterization and the linear law of the distribution of the curvature from the arc length. The problem is solved, provided that the known coordinates of two output points located at the entrance and exit of the flow part of the compressor, as well as the angles of inclination to them are tangent. Unknown coefficients of the linear law of the distribution of the curvature and the length of the arc of the curve are determined by minimizing the deviation of the intermediate points obtained in the optimization process from the initial set points. A software code has been developed that allows to build meridional boundaries and to visualize them on a computer monitor.

Keywords: geometrical modelling, meridional boundaries, flow part, axial compressor, linear dependence of the curvature distribution, arc length.

Валерий БОРИСЕНКО, Андрей УСТЕНКО, Евгений ДРУЗЬ
Николаев

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕРИДИОНАЛЬНЫХ ГРАНИЦ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

В статье предлагается метод геометрического моделирования меридиональных границ проточных частей компрессоров осевого типа с применением кривых, представляемых в натуральной параметризации и с линейным законом распределения кривизны от длины дуги. Задача решается при условии, что известны координаты двух исходных точек, расположенных на входе и выходе из проточной части компрессора, а также углы наклона к ним касательных. Неизвестные коэффициенты линейного закона распределения кривизны и длина дуги окружности определяются путем минимизации отклонения промежуточно полученных в оптимизационном процессе точек от исходных заданных точек. Разработан программный код, который позволяет строить меридиональные обводы и визуализировать их на мониторе компьютера.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, меридиональные границы, проточная часть, осевой компрессор, линейная зависимость распределения кривизны, длина дуги.

Стаття надійшла до редколегії 20.10.2018