

ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОФІЛЮ ЛОПАТКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

С. А. Устенко, доц., канд. техн. наук

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Запропоновано використовувати генетичний алгоритм, оснований на методі випадкового пошуку, для знаходження екстремуму цільової функції при розв'язанні задачі оптимізації геометричних параметрів профілю лопатки турбомашини.

Ключові слова: оптимізація, геометричні параметри, профіль лопатки, модель каналу, генетичний алгоритм, обчислювальна газодинаміка.

Аннотация. Предложено использовать генетический алгоритм, основанный на методе случайного поиска, для нахождения экстремума целевой функции при решении задачи оптимизации геометрических параметров профиля лопатки турбомашини.

Ключевые слова: оптимизация, геометрические параметры, профиль лопатки, модель канала, генетический алгоритм, вычислительная газодинамика.

Abstract. While solving the problem of optimizing the geometric parameters of the turbo machine blade profile, the usage of the genetic algorithm based on the random hunting method in order to find the objective function extremum is proposed.

Keywords: optimization, geometric parameters, blade profile, channel model, genetic algorithm, computational gasdynamics.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Останнім часом проєктанти та виробники лопаткових апаратів турбомашин досягли достатньо високого рівня їх ефективності. Подальше підвищення газодинамічної якості можливе при моделюванні профілів лопаток з оптимальними режимними й, особливо, геометричними параметрами [2].

Оптимізація геометричних і режимних параметрів турбомашин базується на газодинамічному розрахунку плоскої та просторової течії робочої речовини з використанням пакетів програм обчислювальної газодинаміки.

Задача розв'язується у два етапи [4]. На першому етапі пошук оптимальних геоме-

тричних параметрів здійснюється з використанням спрощеної – плоскої – моделі течії робочої речовини. При побудові цільової функції застосовуються залежності для втрат енергії в лопаткових апаратах, отримані експериментальним шляхом, що дозволяє досить швидко визначитися з основними геометричними параметрами плоского перерізу лопатки на середньому радіусі проточної частини турбомашини, враховуючи аеродинамічні, міцнісні, технологічні та інші фактори.

На другому етапі для знаходження оптимальних параметрів використовується тривимірна модель течії в'язкої робочої речовини в проточній частині.

Вибір методу знаходження екстремуму цільової функції задачі оптимізації геометрич-

них та режимних параметрів є важливим питанням при моделюванні профілів лопаток.

Питанню оптимізації геометричних і режимних параметрів присвячені роботи [1, 3]. Методики обчислення втрат енергії експериментальним шляхом наведені в роботі [5].

МЕТОЮ СТАТТІ є адаптація генетичного алгоритму для розв’язання задачі оптимізації геометричних параметрів профілю лопатки турбомашини на першому етапі.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Під оптимізацією геометричних параметрів розуміють пошук такого їх сполучення, при якому цільова функція набуває екстремального значення. Для розглядуваної задачі треба знайти максимум функції цілі.

Спочатку за методикою, наведеною в роботі [7], будується модель каналу (рис. 1) для газодинамічного розрахунку плоскої течії робочої речовини в системі FlowVision. Для цього використовується розроблене програмне забезпечення [6], а результати за допомогою системи автоматизованого проектування AutoCAD зберігаються у форматі DXF і після низки перетворень у системі SolidWorks у вигляді тривимірної моделі завантажуються в пакет програм обчислювальної газодинаміки FlowVision (CFD-пакет).

Після числового моделювання в системі FlowVision результати зберігаються в текстовому файлі, які потім можна візуалізувати або обробити будь-якою програмою для аналізу результатів.

Втрати енергії при дослідженні обтікання плоскої решітки, зазвичай, визначаються як різниця повних енергій у деяких довільних точках до та після решітки:

$$\zeta = \left(p_1 + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} \right) - \left(p_2 + \frac{\rho_2 v_2^2}{2} \right),$$

де p_1 і p_2 — значення тиску; v_1 та v_2 — модулі швидкості; ρ_1 і ρ_2 — густина робочої речовини відповідно на вході та виході.

Ці дані можна одержати в системі FlowVision вздовж входу та виходу за кроком решітки.

Для характеристики роботи решітки вводиться середня за кроком t величина втрат

$$\zeta_{\text{ср}} = \frac{1}{t} \int_x^{x+t} \zeta dx.$$

Отримані значення втрат енергії виражають у долях або відсотках від повної енергії на вході:

$$\bar{\zeta} = \frac{\zeta_{\text{ср}}}{p_1 + \rho_1 v_1^2 / 2}.$$

Знаючи безрозмірні величини втрат енергії, можна визначити коефіцієнт корисної дії решітки профілів за наступною формулою:

$$\eta = 1 - \bar{\zeta}.$$

Крім того, на основі коефіцієнта втрат енергії визначають важливі в турбобудуванні швидкісні коефіцієнти для соплового апарата φ та робочого колеса ψ , які визначаються за однаковою формулою

$$\varphi = \sqrt{1 - \bar{\zeta}}.$$

Швидкісний коефіцієнт є одним з важливіших при визначенні ефективності змодельованої решітки профілів. Тому подальша оптимізація відбувається на його основі.

Аналітичне подання цільової функції, що враховує нелінійний характер залежності ефективності проточної частини від геометричних параметрів, будується на основі регресійної моделі другого порядку з використанням трирівневих планів Бокса–Бенкіна [3].

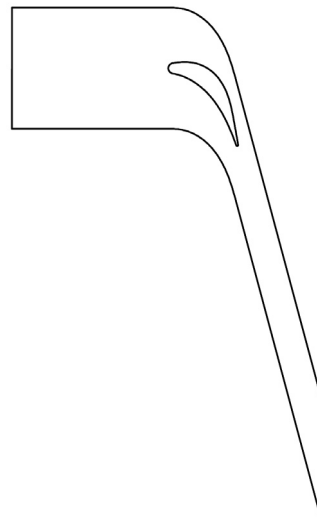


Рис. 1. Приклад моделі каналу

Згідно із цими планами, у залежності від кількості параметрів, треба змодельовати та обчислити певну кількість варіантів моделей каналу і на їх основі побудувати регресійну модель другого порядку.

Для знаходження екстремуму пропонується застосовувати генетичний алгоритм, в основі якого лежить метод випадкового пошуку. Цей алгоритм був запропонований у 1975 році Джоном Холландом. Він отримав назву «репродуктивний план Холланда» і був покладений в основу практично всіх варіантів генетичних алгоритмів.

З біології відомо, що будь-який організм відрізняється своїм фенотипом, який фактично визначає, чим є об'єкт у реальному світі, та генотипом, що містить усю інформацію про об'єкт на рівні хромосомного набору. При цьому кожний ген, тобто елемент інформації генотипу, має своє відображення у фенотипі.

Таким чином, для розв'язання задач потрібно подати кожну ознаку об'єкта у формі, що підходить для використання в генетичному алгоритмі. Усе подальше функціонування механізмів генетичного алгоритму виконується на рівні генотипу, що дозволяє обійтися без інформації про внутрішню структуру об'єкта, завдяки чому алгоритм широко застосовується в найрізноманітніших задачах.

У найпоширенішому різновиді генетичного алгоритму для зображення генотипу об'єкта застосовуються бітові рядки. При цьому кожному атрибуту об'єкта у фенотипі відповідає один ген у генотипі об'єкта. Ген являє собою бітовий рядок, як правило, фіксованої довжини, що є певною ознакою об'єкта.

Для ознак, що подаються цілими числами, можна використовувати найпростіший варіант — бітове значення цієї ознаки. Тоді можна просто застосовувати ген певної довжини, достатньої для уявлення всіх можливих значень такої ознаки. Але таке кодування має недоліки. Основний з них полягає в тому, що сусідні числа відрізняються декількома бітами. Так, наприклад, числа 7 та 8 у бінарному вигляді розрізняються за чотири позиціями, що ускладнює функціонування генетичного алгоритму і збільшує час, потрібний для його збіжності.

Для того щоб цьому запобігти, треба використовувати кодування, при якому сусідні числа відрізняються меншою кількістю позицій, краще — значенням одного біта. Таким кодом є код Грея, який доцільно застосовувати при реалізації генетичного алгоритму. Відповідність десяткових кодів кодам Грея та їх значення наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Відповідність десяткових кодів кодам Грея

Десяткові коди			Коди Грея		
Число	Бінарний код	Hex-код	Число	Бінарний код	Hex-код
0	0000	0h	0	0000	0h
1	0001	1h	1	0001	1h
2	0010	2h	3	0011	3h
3	0011	3h	2	0010	2h
4	0100	4h	6	0110	6h
5	0101	5h	7	0111	7h
6	0110	6h	5	0101	5h
7	0111	7h	4	0100	4h
8	1000	8h	12	1100	Ch
9	1001	9h	13	1101	Dh
10	1010	Ah	15	1111	Fh
11	1011	Bh	14	1110	Eh
12	1100	Ch	10	1010	Ah
13	1101	Dh	11	1011	Bh
14	1110	Eh	9	1001	9h
15	1111	Fh	8	1000	8h

Таким чином, при кодуванні цілочислової ознаки її розбивають по чотири біти, які перетворюють за кодом Грея.

У практичних реалізаціях генетичних алгоритмів звичайно не виникає необхідності перетворювати значення ознаки в значення гена. На практиці має місце обернена задача, коли за значенням гена потрібно визначити значення відповідної йому ознаки.

Для кодування ознак, яким відповідають числа з плаваючою точкою, застосовують певну послідовність дій.

1. Розбивають весь інтервал допустимих значень ознаки на ділянки з потрібною точністю.

2. Приймають значення гена як ціле число, що визначає номер інтервалу (використовуючи код Грея).

3. Як значення параметра приймають число, що є серединою цього інтервалу.

Таким чином, для того щоб визначити фенотип об'єкта (тобто значення ознак, що його описують), потрібно знати значення генів, відповідні цим ознакам, тобто генотип об'єкта. При цьому сукупність генів, що описують генотип об'єкта, являє собою хромосому. Отже, в реалізації генетичного алгоритму хромосома являє собою бітовий рядок фіксованої довжини, кожній ділянці якого відповідає ген.

У теорії еволюції важливу роль відіграє спосіб, за яким ознаки батьків передаються нащадкам. У генетичних алгоритмах за передачу нащадкам ознак батьків відповідає оператор, що має назву схрещування (його також називають «кросовер»). Діє він наступним чином:

- 1) з популяції обираються дві особини, які будуть батьками;
- 2) визначається (випадково) точка розриву;
- 3) нащадок визначається як конкатенація частини першого та другого батьків.

Наступний генетичний оператор призначений для того, щоб підтримувати різноманіття хромосом у популяції. Він називається оператором мутації. При використанні даного оператора кожний біт у хромосомі з певною ймовірністю інвертується.

Крім того, застосовується оператор інверсії, дія якого полягає в тому, що хромосома ділиться на дві частини, а потім вони міняються місцями.

Розглянемо схему функціонування генетичного алгоритму в його класичному варіанті.

1. Ініціювати початковий момент часу $t = 0$. Випадково сформувати початкову популяцію, що складається з k хромосом: $B_0 = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$.

2. Обчислити пристосованість кожної особини $FA_i = fit(A_i)$, де $i = 1 \dots k$, та популяції в цілому $F_t = fit(B_t)$ (її інколи називають фітнес-функцією). Значення цієї функції визначає, наскільки добре підходить особина, описана даною хромосомою, для розв'язання задачі.

3. Вибрати особину A_c із популяції: $A_c = get(B_t)$.

4. З певною ймовірністю (ймовірністю кросовера P_c) вибрати другу особину з популяції $A_{c1} = get(B_t)$ і виконати оператор кросовера: $A_c = crossing(A_c, A_{c1})$.

5. З певною ймовірністю (ймовірністю мутації P_m) виконати оператор мутації: $A_c = mutation(A_c)$.

6. З певною ймовірністю (ймовірністю інверсії P_i) виконати оператор інверсії: $A_c = inversion(A_c)$.

7. Помістити отриману хромосому в нову популяцію: $insert(B_{t+1}, A_c)$.

8. Виконати операції, починаючи з пункту 3, k разів.

9. Збільшити номер поточної епохи $t = t + 1$.

10. Якщо виконалася умова зупину, то завершити роботу, інакше відбудеться перехід до пункту 2.

На основі запропонованого матеріалу було розроблене програмне забезпечення оптимізації геометричних параметрів профілю лопатки за допомогою генетичного алгоритму.

Розглянемо приклад геометричного моделювання плоского перерізу лопатки соплового апарата осевої турбомашини із частиною міжлопаткового каналу. Вихідні дані для профілювання наведені в табл. 2.

Для газодинамічного розрахунку плоскої течії робочої речовини обирається модель рідини, що повністю стискається. Початковими значеннями для розрахунку є такі: на вході — температура 400 К, тиск 150000 Па; на виході — температура 273 К, тиск 101325 Па.

Таблиця 2. Вихідні дані для профілювання соплового апарата

Геометричні параметри	Позначення та одиниці вимірювання	Значення
Осьова ширина решітки	B , мм	17,3
Кут установлення профілю	β_0 , град	41,7
Кут входу потоку	β_1 , град	90
Кут виходу потоку з решітки	β_2 , град	15
Радіус закруглення вхідної кромки	r_1 , мм	1,3
Радіус закруглення вихідної кромки профілю	r_2 , мм	0,25
Кут загострення вхідної кромки	γ_1 , град	20
Кут загострення вихідної кромки	γ_2 , град	10
Крок решітки (див. рис. 2)	t , мм	20
Величина горла міжлопаткового каналу	a , мм	5,8
Кут відгину вихідної кромки	δ , град	28
Максимальна товщина профілю	c_{\max} , мм	3,8
Віддалення максимальної товщини від вхідної кромки	$x_{c_{\max}}$, мм	5

У відповідності до планів Бокса–Бенкіна досліджено 13 варіантів міжлопаткових каналів соплових апаратів осьової турбіни. Геометричні параметри варіювалися на трьох рівнях, що відповідають — 1, 0, 1: $\gamma_1 = 12,5; 20,0; 27,5$ град; $\gamma_2 = 7; 10; 13$ град; $r_1 = 1,0; 1,3; 1,6$ мм.

Аналітична залежність цільової функції на основі апроксимації істинної гіперповерхні поліноміальною моделлю другого порядку буде мати наступний вигляд (втрати швидкості визначаються у відсотках):

$$\varphi = 96,4195 - 0,0029\tilde{\gamma}_1 + 0,2744\tilde{\gamma}_2 + 0,0545\tilde{r}_1 - 0,1059\tilde{\gamma}_1^2 + 0,0465\tilde{\gamma}_2^2 + 0,0735\tilde{r}_1^2 - 0,0847\tilde{\gamma}_1\tilde{\gamma}_2 + 0,0835\tilde{\gamma}_1\tilde{r}_1 + 0,0841\tilde{\gamma}_2\tilde{r}_1,$$

де $\tilde{\gamma}_1, \tilde{\gamma}_2, \tilde{r}_1$ — відносні величини на трьох рівнях варіювання параметрів.

За допомогою розробленої програми була розв'язана задача оптимізації геометричних параметрів соплової лопатки осьової турбіни.

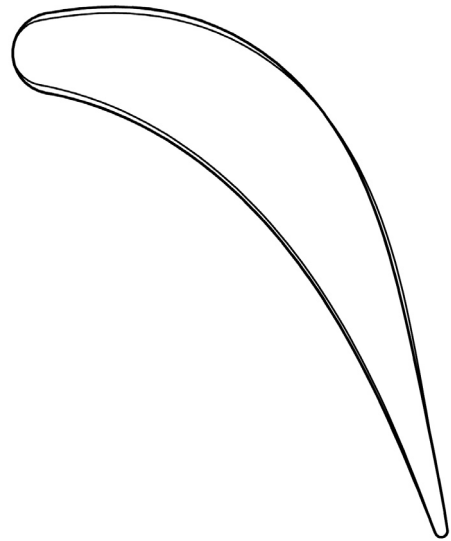
У результаті отримані такі оптимальні дані:

$$\varphi = 96,95\%; \tilde{\gamma}_1 = -0,019358; \tilde{\gamma}_2 = 1; \tilde{r}_1 = 1.$$

Абсолютні значення геометричних параметрів для оптимального профілю

$$\gamma_1 = 19,85 \text{ град}; \gamma_2 = 13 \text{ град}; r_1 = 1,6 \text{ мм}.$$

На рис. 2 показано геометричні моделі плоских перерізів лопатки соплового апарата осьової турбіни до оптимізації (тонка лінія) та після неї (товста лінія).

**Рис. 2.** Порівняння профілів до та після оптимізації

Слід відмітити, що геометричні параметри для вихідного профілю були взяті після попереднього моделювання проточної частини осьової багатоступінчастої турбіни. Розходження між вихідним профілем та оптимальним — візуально незначні, хоча при цьому різниця коефіцієнтів втрат швидкості потоку робочої речовини складає приблизно 0,53 %.

ВИСНОВКИ

Для розв'язання задачі оптимізації геометричних параметрів профілю лопатки

турбомашини на першому етапі запропоновано використовувати генетичний алгоритм, який є більш стійким до ефектів локальних екстремумів на поверхні значень функцій обмежень. Розроблено програмне забезпе-

чення оптимізації геометричних параметрів та наведено приклад оптимізації профілю лопатки. У подальшому планується застосувати генетичний алгоритм на другому етапі задачі оптимізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Бойко, А. В.* Аэродинамика проточной части паровых и газовых турбин: расчеты, исследования, оптимизация, проектирование [Текст] : монография / А. В. Бойко, А. В. Гаркуша. — Харьков : ХГПУ, 1999. — 360 с.
- [2] *Борисенко, В. Д.* Впровадження досліджень з геометричного моделювання у практику створення проточних частин турбомашин [Текст] / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — 2003. — Вип. 73. — С. 72–77.
- [3] *Левенберг, В. Д.* Судовые турбоприводы [Текст] : справочник / В. Д. Левенберг. — Л. : Судостроение, 1983. — 328 с.
- [4] *Михайленко, В. Є.* Шляхи підвищення ефективних показників осьових і радіальних турбомашин [Текст] / В. Є. Михайленко, С. А. Устенко // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка». — 2009. — Вип. 81. — С. 3–10.
- [5] *Повх, И. Л.* Аэродинамический эксперимент в машиностроении [Текст] / И. Л. Повх. — М.; Л. : Машиностроение, 1965. — 480 с.
- [6] *Устенко, С. А.* Комп'ютерна реалізація методів геометричного моделювання плоских кривих ліній із застосуванням графіків розподілу їх кривини [Текст] / С. А. Устенко // Науковий потенціал вищої школи : зб. наук. пр. — 2008. — С. 73–77.
- [7] *Устенко, С. А.* Побудова геометричної моделі плоского перерізу лопатки для газодинамічних розрахунків в системі FLOW VISION [Текст] / С. А. Устенко // Геометричне та комп'ютерне моделювання / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. — 2009. — Вип. 25. — С. 153–158.