



МЕЛАШИЧ

Сергій Васильович — кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу динаміки гідромеханічних систем Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України, melashych@mail.ru

УДК 533.697:621.51:004.89

ЧИСЕЛЬНЕ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОФІЛІВ КОМПРЕСОРНИХ РЕШІТОК

За матеріалами наукового повідомлення
на засіданні Президії НАН України
8 жовтня 2014 року

Розроблено науково-методичне забезпечення для комплексного розв'язання задач аеродинамічного проектування і оптимізації профілів компресорних решіток, яке може бути використано для визначення раціональних геометричних параметрів лопаткових вінців компресорів авіаційних газотурбінних двигунів на етапі проектування, а також для дослідження структури потоку в компресорних решітках та прогнозування їх аеродинамічних характеристик у робочому діапазоні зміни режимних параметрів. Окремі науково-методичні розробки впроваджено на ДП «Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя), і нині їх використовують при проектуванні лопаткових вінців компресорів сучасних газотурбінних двигунів.

Ключові слова: компресорна решітка, аеродинамічна оптимізація, обернена задача газодинаміки, чисельне моделювання.

Вступ

Проблема підвищення якості аеродинамічного проектування авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) є актуальною як для України, так і для інших країн — розробників авіаційної техніки. Це зумовлено тим, що сьогодні в умовах жорсткої конкуренції дедалі гострішою стає необхідність не лише збереження раніше досягнутих позицій на світових ринках збуту авіаційної техніки, а й їх додаткового посилення, що може бути досягнуто передусім завдяки підвищенню енергоефективності авіаційних ГТД. Енергоефективність авіаційних ГТД значною мірою залежить від розв'язання проблеми підвищення аеродинамічної досконалості проточної частини лопаткових вінців компресорів. Одним із шляхів вирішення цієї

проблеми є використання сучасних ефективних наукових розробок на етапі проектування компресорів.

У роботі представлено науково-методичне забезпечення для розв'язання задач аеродинамічного проектування та оптимізації лопаткових вінців компресорів ГТД у двовимірній постановці в рамках єдиного підходу. Двовимірна постановка задачі передбачає побудову плоскої компресорної решітки, яка забезпечує заданий поворот потоку за мінімальних втрат механічної енергії в решітці.

Процес аеродинамічного проектування і оптимізації форми профілів компресорних решіток включає розв'язання таких задач:

- 1) визначення вихідних геометричних параметрів решітки на основі спрощених моделей течії;
- 2) перевірочні розрахунки аеродинамічних характеристик решітки на основі моделей течії високого рівня;
- 3) аеродинамічна оптимізація геометричних параметрів профілів компресорних решіток.

Визначення вихідних геометричних параметрів решітки на основі спрощених моделей течії

Вихідні геометричні параметри решітки визначають шляхом розв'язання оберненої задачі газодинаміки решіток профілів. Постановку оберненої задачі для плоскої компресорної решітки профілів можна подати так: задано швидкість потоку на вході в решітку, а також кути входу і виходу потоку; потрібно визначити геометричні параметри решітки, течія в якій задовольняє задані умови.

Для забезпечення коректності поставленої задачі необхідно задати розподіл тиску по обводу профілю шуканої решітки. Такий підхід до проектування забезпечує безпосередній контроль над процесом розроблення, оскільки розподіл тиску контролює всі основні особливості течії, такі як відрив потоку, втрати на стрибках ущільнення тощо. Таким чином усувається необхідність використання методу проб і помилок у процесі проектування.

Для вирішення цієї задачі стисливість газу враховувалася в рамках наближення Чаплигіна, відповідно до якого течія ідеального газу замінюється течією гіпотетичного газу з лінійною залежністю тиск — питомий об'єм. Це дозволяє застосувати до розв'язання оберненої задачі теорію конформних відображень.

На основі багатопараметричних чисельних досліджень виявлено основні закономірності впливу розподілу тиску, що задається по обводу профілю, і кута повороту потоку в решітці на форму шуканого профілю. Урахування цих закономірностей спрощує пошук розв'язку оберненої задачі газодинаміки решіток профілів.

Науково-методичне забезпечення для розв'язання обернених задач газодинаміки компресорних решіток впроваджено і використовується на ДП «Івченко-Прогрес» (Запоріжжя).

Як було зазначено, при розв'язанні оберненої задачі застосовують модель ідеального газу. Однак течія в'язкого газу може істотно відрізнятися від течії ідеального, що у свою чергу зумовлює необхідність урахування в'язкості при розв'язанні оберненої задачі газодинаміки. Слід зауважити, що, як правило, при обтіканні решіток профілів в'язкість проявляється лише в досить тонкому шарі — завтовшки менш як 10% ширини міжлопаткового каналу. Взнявши це до уваги, урахування в'язкості можна здійснити в рамках моделі примежового шару.

Розрахунок турбулентного примежового шару на профілі решітки виконують з використанням методу інтегральних співвідношень. Турбулентний примежовий шар описується системою трьох звичайних диференціальних рівнянь для товщини втрати імпульсу, форм-параметра і коефіцієнта зносу. Використання такої моделі дозволяє контролювати виникнення відриву потоку, який зазвичай негативно позначається на аеродинамічних характеристиках решітки. Керування відривом потоку здійснюють шляхом коригування вихідного розподілу тиску вздовж профілю.

Науково-методичне забезпечення для моделювання турбулентного примежового шару на профілях компресорних решіток використовується на ДП «Івченко-Прогрес».

Перевірочні розрахунки аеродинамічних характеристик решітки на основі моделей течії високого рівня

Після того як вихідну решітку побудовано, її аеродинамічні характеристики визначають чисельним моделюванням течії на основі системи осереднених рівнянь Нав'є – Стокса, записаних в узагальнених криволінійних координатах, яка замкнута за допомогою однопараметричної моделі турбулентності SALSA.

Особливу увагу приділено питанню верифікації розробленої методики чисельного моделювання. Верифікацію виконано шляхом розв'язання задачі про взаємодію косою стрибка ущільнення з ламінарним прилеглим шаром чисельним моделюванням течії у трансзвуковому дифузорі Зайбена (рис. 1), чисельним моделюванням трансзвукових течій у

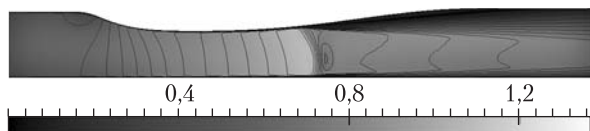


Рис. 1. Течія в трансзвуковому дифузорі (розподіл чисел Маха)

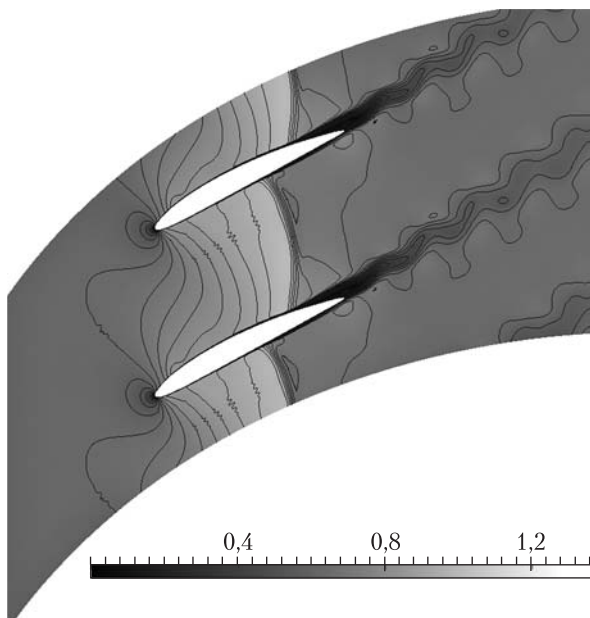


Рис. 2. Трансзвукова течія в компресорній решітці (розподіл чисел Маха при режимі запирання)

компресорних решітках (рис. 2), а також за допомогою спільного розв'язання прямої і оберненої задач газодинаміки решіток профілів.

Отримані результати задовільно узгоджуються з наявними експериментальними даними, що підтверджує працездатність розробленої методики математичного моделювання.

Аеродинамічна оптимізація геометричних параметрів профілів компресорних решіток

Одним із основних факторів, що впливають на ефективність виконання процесу аеродинамічної оптимізації, є кількість параметрів, за допомогою яких відбувається варіювання форми профілю компресорної решітки. Їх кількість, з одного боку, має бути досить малою, щоб забезпечити прийнятний час виконання процедури оптимізації, а з іншого – достатньо великою, щоб забезпечити можливість варіювання форми міжлопаткового каналу в широкому діапазоні всіх можливих форм.

Розроблено методику параметричного опису профілів за допомогою кривих Безьє і системи гладких опуклих функцій. Підтверджено працездатність розробленої методики, виконано оцінки числа варійованих параметрів, необхідних для опису форми профілів компресорних решіток з високою точністю. Показано, що вона дозволяє варіювати форму міжлопаткового каналу в широкому діапазоні аеродинамічно коректних форм за порівняно меншого числа варійованих параметрів.

Запропоновано спосіб раціонального вибору числа вузлів розрахункової сітки, застосування якого дає змогу зменшити обчислювальні витрати під час розв'язання задач аеродинамічної оптимізації з розрахунком цільової функції на основі чисельного моделювання турбулентних газових потоків.

Отже, розв'язання задачі аеродинамічної оптимізації зводиться до розв'язання задачі про пошук екстремуму функції при заданих обмеженнях, яка вирішується за допомогою детермінованих методів нелінійного програмування.

Практичне застосування розробленого науково-методичного забезпечення

Розроблене науково-методичне забезпечення для розв'язання задач аеродинамічного проектування і оптимізації решіток профілів апробовано шляхом побудови плоскої решітки з великим кутом вигину профілю. З використанням методики розв'язання обернених задач побудовано вихідну решітку (рис. 3).

Для визначення аеродинамічних характеристик решітки здійснено чисельне моделювання турбулентної течії в ній. Отримані аеродинамічні характеристики задовільно узгоджуються з розрахунками, проведеними фахівцями ДП «Івченко-Прогрес». Виконано аеродинамічну оптимізацію такої решітки. У результаті коефіцієнт втрат повного тиску знижено на 30% порівняно з його вихідним значенням.

Профіль побудованої компресорної решітки надалі було використано на ДП «Івченко-Прогрес» при проектуванні прямого апарата останнього ступеня осевого компресора наземної газоперекачувальної установки.

Інтелектуальна експертна система проектування компресорних вінців

Наведене вище науково-методичне забезпечення було розвинуто до інтелектуальної експертної системи проектування компресорних вінців. Основними елементами цієї системи є єдина база даних, що містить результати натурних і числових експериментів, а також штучна нейронна мережа, яка дає змогу визначити аеродинамічні характеристики компресорного вінця на основі геометричних параметрів, що закладаються проектувальником.

Виконано верифікацію розробленої системи з використанням наявних експериментальних даних. Точність результатів, отриманих при розв'язанні як прямих, так і обернених задач газодинаміки компресорних решіток з вико-

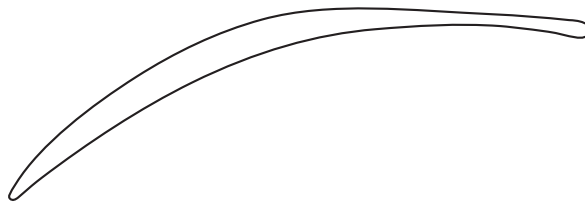


Рис. 3. Профіль компресорної решітки, отриманої в результаті розв'язання оберненої задачі

ристанням зазначеної інтелектуальної системи, перебуває в межах точності наявних на сьогодні методик чисельного моделювання газових течій у компресорних решітках, проте час, що витрачається на пошук розв'язку, на порядок менший.

Висновки

У роботі представлено науково-методичне забезпечення для комплексного розв'язання задач аеродинамічного проектування і оптимізації профілів компресорних решіток, яке може бути використано для визначення раціональних геометричних параметрів лопаткових вінців компресорів авіаційних газотурбінних двигунів на етапі проектування, а також для дослідження структури потоку в компресорних решітках та прогнозування їх аеродинамічних характеристик у робочому діапазоні зміни режимних параметрів. На сьогодні це забезпечення не має аналогів в Україні.

Окремі науково-методичні розробки — методику розв'язання обернених задач газодинаміки решіток профілів і методику чисельного моделювання турбулентного примежового шару на профілях компресорних решіток впроваджено на ДП «Івченко-Прогрес» (Запоріжжя). Зокрема, за їх допомогою було спроектовано вихідний напрямний апарат, який забезпечує великі кути повороту потоку, для компресора наземної газоперекачувальної установки. Нині ці розробки використовують при проектуванні лопаткових вінців компресорів сучасних газотурбінних двигунів.

С.В. Мелашч

Институт технической механики Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины
ул. Лешко-Попеля, 15, Днепропетровск, 49005, Украина

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОФИЛЕЙ КОМПРЕССОРНЫХ РЕШЕТОК

Разработано научно-методическое обеспечение для комплексного решения задач аэродинамического проектирования и оптимизации профилей компрессорных решеток, которое может быть использовано для определения рациональных геометрических параметров лопаточных венцов компрессоров авиационных газотурбинных двигателей на этапе проектирования, а также для исследования структуры потока в компрессорных решетках и прогнозирования их аэродинамических характеристик в рабочем диапазоне изменения режимных параметров. Отдельные научно-методические разработки внедрены на ГП «Ивченко-Прогресс» (г. Запорожье) и в настоящее время используются при проектировании лопаточных венцов компрессоров современных газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: компрессорная решетка, аэродинамическая оптимизация, обратная задача газодинамики, численное моделирование.

S.V. Melashych

Institute of Technical Mechanics of National Academy of Sciences of Ukraine
and State Space Agency of Ukraine
15 Leshko-Popelya St., Dnipropetrovsk, 49005, Ukraine

NUMERICAL SOLUTION OF COMPRESSOR CASCADE AERODYNAMIC OPTIMIZATION PROBLEMS

The scientific and methodological support for a comprehensive approach to the aerodynamic design and optimization of compressor cascade profiles is developed. The mentioned above scientific and methodological support can be used for the determination of the compressor blades rational geometric parameters of aircraft gas turbine engines compressor rims at the design stage, as well as for the study of the flow structure in the compressor cascades and predicting their aerodynamic characteristics in the operating range of the mode parameters. Specific scientific and methodological developments are introduced on the SE «Ivchenko-Progress» (Zaporozhye) and they are currently used in the design of compressor blade rims of modern gas turbine engines.

Keywords: compressor cascade, aerodynamic optimization, inverse design, numerical simulation.