

УДК 621.452.3

В.Н. МАТВЕЕВ, О.В. БАТУРИН, Г.М. ПОПОВ*Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет), Россия*

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Проведена двухкритериальная оптимизация многоступенчатого компрессора высокого давления газотурбинного двигателя. В качестве оптимизируемых параметров использованы углы установки лопаток, а в качестве критериев оптимизации – максимальные КПД на двух частотах вращения компрессора. В ходе оптимизации достигнуто повышение КПД компрессора на основных режимах работы до 1,6% при сохранении положений рабочих точек на характеристике компрессора в заданных диапазонах. Анализ результатов показал, что оптимизация позволила устранить отрывы потока во втулочных сечениях лопаток рабочих колёс 4 и 5 ступени.

Ключевые слова: численная модель, оптимизация, многоступенчатый компрессор, валидация, характеристики компрессора, вычислительная газовая динамика.

Введение

В процессе доводки компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) необходимо учитывать противоречивые требования надёжности и газодинамической эффективности, как правило, на различных режимах работы. Данный процесс является итеративным и заключается в проверке влияния тех или иных мероприятий на требуемые показатели компрессора. Современные программы CFD-моделирования, такие как NUMECA FineTurbo [1] или ANSYS CFX, позволяют ускорить процесс доводки компрессоров и использовать при этом методы оптимизации, один из которых, в частности, реализован в программном комплексе IOSO [2]. В данной работе приведены результаты оптимизации семиступенчатого компрессора высокого давления (КВД) ГТД. Целью оптимизации являлось повышение КПД КВД на двух режимах его работы (при относительных частотах вращения 80% и 100%) за счёт варьирования углами установки лопаток всех рабочих колёс, направляющих аппаратов и входного направляющего аппарата.

Решение задачи оптимизации состояло из следующих этапов:

- постановки задачи оптимизации;
- создания и валидации параметрической газодинамической численной модели многоступенчатого компрессора,
- решения задачи оптимизации;
- анализа результатов оптимизации многоступенчатого компрессора.

1. Постановка задачи оптимизации

Как было отмечено выше, в качестве объекта оптимизации был выбран семиступенчатый КВД ГТД с входным направляющим аппаратом.

Целью оптимизации являлось повышение его наибольших КПД на относительных частотах вращения 80% и 100%. По этой причине в качестве критериев оптимизации были выбраны максимальные КПД на характеристиках компрессора при относительных частотах вращения 80% и 100%.

Для предотвращения сдвига характеристик компрессора при оптимизации были установлены следующие ограничения:

– расход рабочего тела оптимизированного КВД при максимальном КПД на относительной частоте вращения 80% не должен был отличаться от соответствующего расхода базового компрессора более, чем на $\pm 1,3\%$;

– расход рабочего тела оптимизированного КВД при максимальном КПД на относительной частоте вращения 100% не должен был отличаться от соответствующего расхода базового компрессора более, чем на $\pm 0,6\%$;

– изменение значения степени повышения давления оптимизированного КВД по сравнению с базовым компрессором в точках максимума КПД при относительных частотах вращения 80% и 100% допускалось в пределах $\pm 1,5\%$.

При постановке задачи оптимизации и назначении ограничений не учитывалось изменение запасов газодинамической устойчивости КВД (в отличие

от работы [3]), в целях сокращения времени её решения. Оценка изменения запасов газодинамической устойчивой КВД проводилась на этапе анализа результатов оптимизации.

Схематично критерии оптимизации и ограничения, использованные при постановке задачи оптимизации, представлены на рис. 1.

В качестве варьируемых переменных были выбраны углы установки всех рабочих лопаток, направляющих аппаратов и входного направляющего аппарата КВД (рис. 2). Диапазон изменения углов установки лопаток каждого лопаточного венца был выбран таким образом, чтобы при повороте лопаток их профили вписывались в существующие лопаточные замки. Число лопаток в венцах не менялось. Данное решение позволяло найти такой вариант повышения КПД КВД, который не требовал бы изменения конструкции дисков и корпусных деталей компрессора. Общее количество варьируемых переменных составило 15.

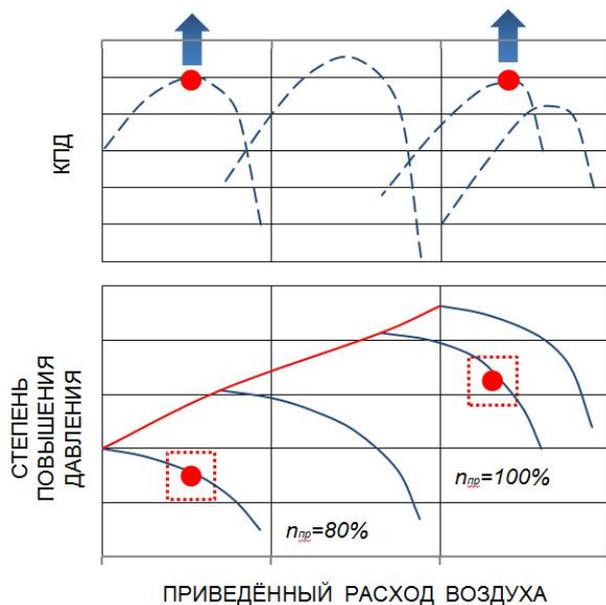


Рис. 1. Постановка задачи оптимизации

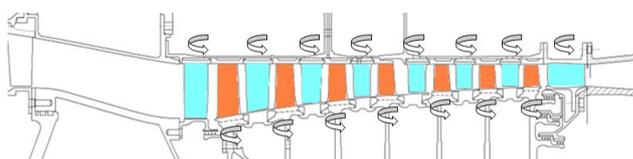


Рис. 2. Варьируемые переменные

2. Создание и валидация параметрической газодинамической численной модели КВД

Газодинамическая численная модель КВД была создана в программном комплексе NUMECA

FineTurbo и включала в себя домены всех лопаточных венцов КВД и опоры, расположенной перед компрессором (рис. 3).

Построение сетки выполнялось в программе Numeca Autogrid5. Для изменения углов установки лопаток была использована программа Profiler [4]. Данная программа была интегрирована с сеткопостроителем, что позволило автоматически перестраивать численную модель КВД в процессе оптимизации.

При выполнении расчётов применялась модель турбулентности Spalart-Allmaras. Расчёт уравнений в доменах рабочих колёс вёлся во вращающейся системе координат. Скорость вращения соответствовала моделируемому режиму работы. В качестве граничных условий на входе задавалась полная температура и полное давление, на выходе – статическое давление.

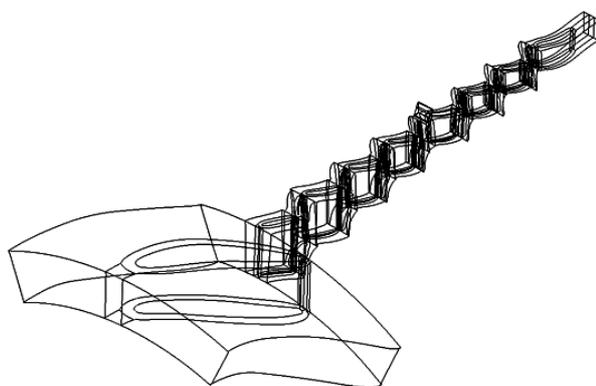


Рис. 3. Геометрия численной модели КВД

Перед проведением оптимизации была выполнена валидация численной модели КВД путём сравнения расчётных (сплошные линии) и экспериментальных (пунктирные линии) напорных и КПД – характеристик базового КВД при относительных частотах вращения 89%, 94%, 100% и 103% (рис. 4). Как видно из рис. 4, созданная численная модель позволяет описывать поведение КПД – характеристик, хотя и имеет погрешность в предсказании значений КПД около 4%. Напорные характеристики созданная численная модель описывает с более высокой точностью. На основании этого был сделан вывод о возможности использования при оптимизации созданной численной модели КВД.

3. Решение задачи оптимизации

Для решения сформулированной задачи оптимизации программному комплексу IOSO потребовалось 446 обращений к численной модели КВД. Каждое обращение к численной модели представляло собой расчёт двух точек на характеристике КВД

(точек максимального КПД на ветках, соответствующих относительным частотам вращения 80% и 100%) в программном комплексе NUMECA FineTurbo.

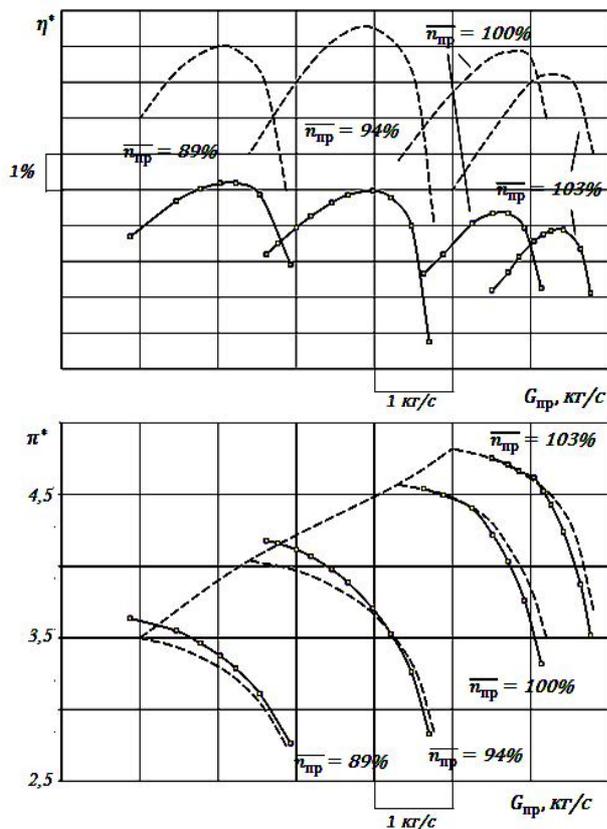


Рис. 4. Валидация расчётной модели КВД

В результате было получено множество улучшаемых решений (множество Парето), которое представляло собой компромисс между повышением КПД на относительной частоте вращения 80% и повышением КПД на относительной частоте вращения 100% (рис. 5). Каждой точке из множества Парето соответствовала уникальная геометрия КВД, представленная в виде массива углов установки всех лопаточных венцов КВД.

Анализ крайних точек множества Парето показал, что на относительной частоте вращения 80% наибольшее повышение максимального КПД составило 1,8% при практически неизменном максимальном КПД на относительной частоте вращения 100% (точка 1 множества Парето на рис. 5). На относительной частоте вращения 100% наибольшее повышение максимального КПД составило 0,6% при повышении максимального КПД на относительной частоте вращения 80% на 1% (точка 2 множества Парето на рис. 5). Однако для дальнейших исследований была выбрана одна из средних точек множества Парето (точка 3 на рис. 5), обеспечивающая повышение КПД как на относительной частоте вра-

щения 100% (на 0,5%), так и на относительной частоте вращения 80% (на 1,2%).

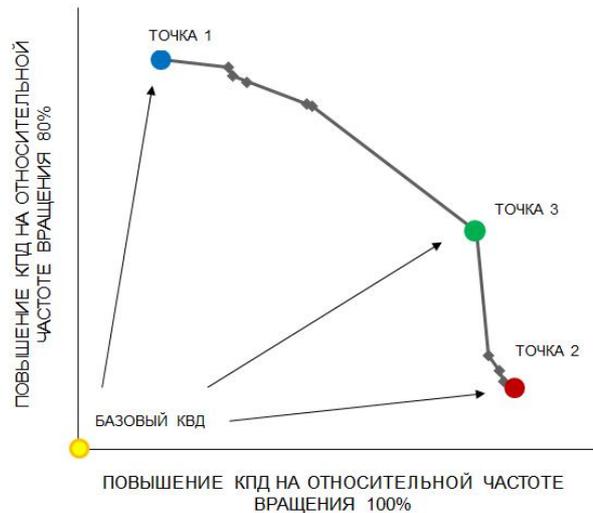


Рис. 5. Множество Парето

4. Анализ результатов оптимизации

Для анализа результатов оптимизации была построена численная модель варианта КВД, соответствующего выбранной точке 3 множества Парето. С помощью этой численной модели были получены характеристики оптимизированного варианта КВД на относительных частотах вращения 80% и 100%, а также выполнено их сравнение с характеристиками базового варианта КВД (рис. 6). На рис. 6 пунктирные линии соответствуют характеристикам базового варианта КВД, сплошные – оптимизированному варианту КВД.

В результате сравнения характеристик было установлено следующее:

- запасы газодинамической устойчивости работы оптимизированного КВД не снизились по сравнению с базовым вариантом на исследованных частотах вращения;

- изменение значений расхода воздуха и степени повышения давления оптимизированного КВД в точках максимального КПД на исследованных частотах вращения находится в пределах принятых ограничений;

- КПД КВД на относительной частоте вращения 80% повысилось на 1,2%, а на относительной частоте вращения 100% повышение КПД составило 0,5%.

Анализ структуры потока в оптимизированном варианте КВД в точке максимального КПД на относительной частоте вращения 100% показал, что оптимизация углов установки лопаток КВД позволила устранить срыв потока во втулочном сечении четвертого и пятого рабочих колёс КВД (рис. 7).

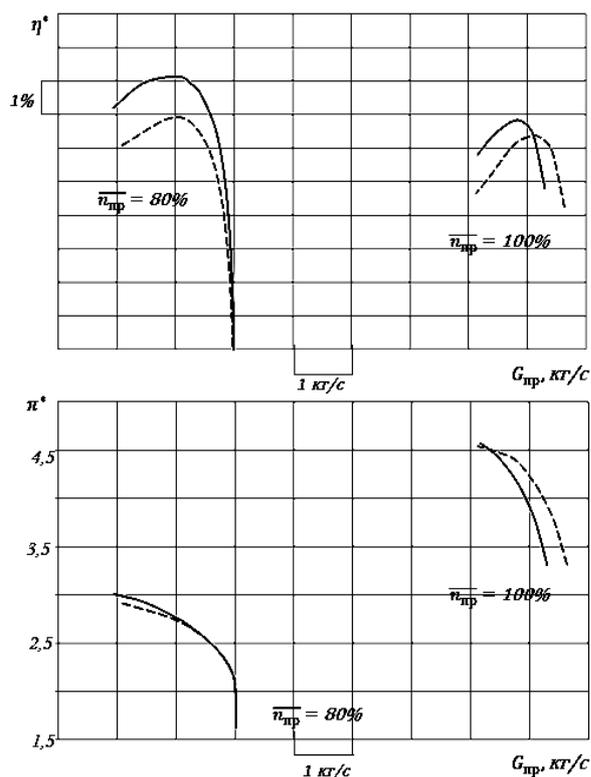


Рис. 6. Сравнение характеристик оптимизированного и базового КВД

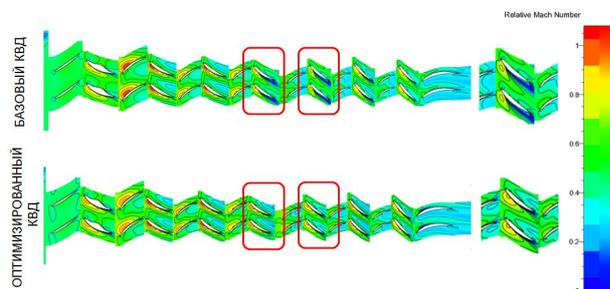


Рис. 7. Поля относительного числа Маха вблизи втулочного сечения базового и оптимизированного КВД

Заключение

Таким образом, в результате выполнения работы показана возможность использования методов

многокритериальной оптимизации и численного газодинамического моделирования для доводки многоступенчатых компрессоров. Создана и верифицирована параметрическая газодинамическая численная модель многоступенчатого компрессора. Практическими результатами работы является повышение КПД многоступенчатого компрессора на двух режимах его работы.

Благодарность

Авторы выражают благодарность профессору И.Н. Егорову (ЗАО «Сигма Технологии») за помощь в постановке задачи оптимизации и анализе результатов.

Литература

1. Numeca International [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.numeca.com>. – 29.05.2013.
2. Sigma Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iosotech.com/>. – 29.05.2013.
3. Optimization of the gas turbine engine parts using methods of numerical simulation [Text] / I.N. Egorov, M.L. Kuzmenko, Yu.N. Shmotin, K.S. Fedechkin // ASME paper GT2007-28205.
4. Дмитриева, И.Б. Автоматизация создания объёмной модели пера лопатки в ANSYS TurboGrid на базе традиционного представления его геометрии [Текст] / И.Б. Дмитриева, Л.С. Шаблій // Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. академика С.П. Королёва. – Самара. – 2011. – № 3 (27), ч. 3. – С. 106-111.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010 в рамках договора с ОАО «Кузнецов».

Поступила в редакцию 29.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры КиПДИА С.В. Фалалеев, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара.

**ПОЛІПШЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОСТУПІНЧАСТОГО КОМПРЕСОРА
ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ***В.М. Матвеев, О.В. Батурін, Г.М. Попов*

Проведено двохкритеріальну оптимізацію багатоступінчастого компресора високого тиску газотурбінного двигуна. В якості параметрів, що оптимізуються, використано кути установки лопаток, а в якості критеріїв оптимізації - максимальні ККД на двох частотах обертання компресора. У ході оптимізації досягнуто підвищення ККД компресора на основних режимах роботи до 1,6% при збереженні положень робочих точок на характеристиці компресора в заданих діапазонах. Аналіз результатів показав, що оптимізація дозволила усунути відрив потоку у втулкових перетинах лопаток робочих коліс 4 і 5 ступеня.

Ключові слова: чисельна модель, оптимізація, багатоступінчастий компресор, валідація, характеристики компресора, обчислювальна газова динаміка.

**MULTISTAGE COMPRESSOR PERFORMANCES IMPROVEMENT
BY USING OPTIMIZATION METHODS***V.N. Matveev, O.V. Baturin, G.M. Popov*

Two-Objective Optimization of the multistage high pressure compressor of gas turbine engine was performed. The blades stagger angles were used as optimization parameters, and maximum efficiency at two different compressor rotor frequencies – as optimization criterions. The efficiency improving up to 1,6% on the main compressor operating modes was achieved during the optimization with saving position of work points in compressor performance map. Analysis of the results showed that the optimization allowed to eliminate the flow separation near hub sections of the rotating blades of 4th and 5th stages.

Key words: numerical model, optimization, multistage compressor, validation, a compressor performance map, computational fluid dynamics.

Матвеев Валерий Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университет им. С.П. Королёва, Самара, e-mail: tdla@ssau.ru.

Батурин Олег Витальевич – канд. техн. наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университет им. С.П. Королёва, Самара, e-mail: udet@mail.ru.

Попов Григорий Михайлович – асп. каф. теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университет им. С.П. Королёва, Самара, e-mail: grishatty@gmail.com.