

УДК 621.452.3

## ПОВЫШЕНИЕ КПД МНОГОСТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА ЗА СЧЁТ ОПТИМИЗАЦИИ УГЛОВ УСТАНОВКИ ЛОПАТОК

© 2013 В.Н. Матвеев<sup>1</sup>, И.Н. Егоров<sup>2</sup>, Д.А. Колмакова<sup>1</sup>, Г.М. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup> ЗАО “Сигма Технологии”

Поступила в редакцию 27.03.2013

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.

Ключевые слова: численная модель, оптимизация, многоступенчатый компрессор

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], 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 КВД;
- решения задачи оптимизации;
- анализа результатов оптимизации КВД.

Матвеев Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: tdl@ssau.ru

Егоров Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: egorov300657@yandex.ru

Колмакова Дарья Алексеевна, инженер. E-mail: kolmakova.daria@gmail.com

Попов Григорий Михайлович, аспирант. E-mail: grishatty@gmail.com

**Постановка задачи оптимизации.** В качестве объекта оптимизации был выбран семиступенчатый КВД ГТД с входным направляющим аппаратом. 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 установок всех рабочих лопаток,

направляющих аппаратов и входного направляющего аппарата КВД (рис. 2).

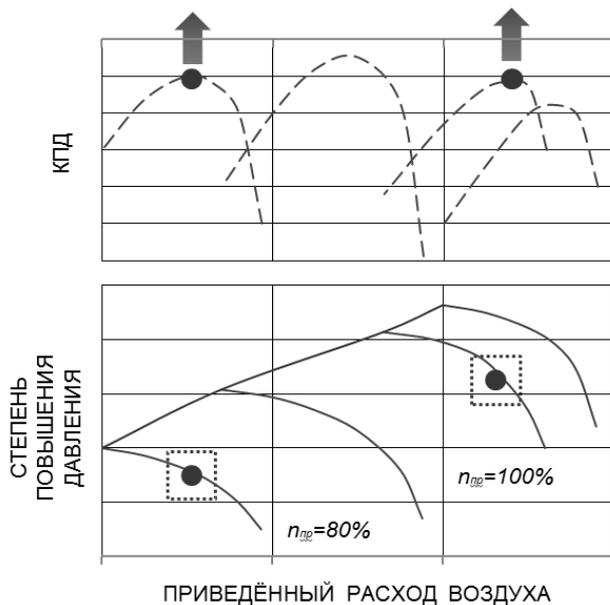


Рис. 1. Постановка задачи оптимизации

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.

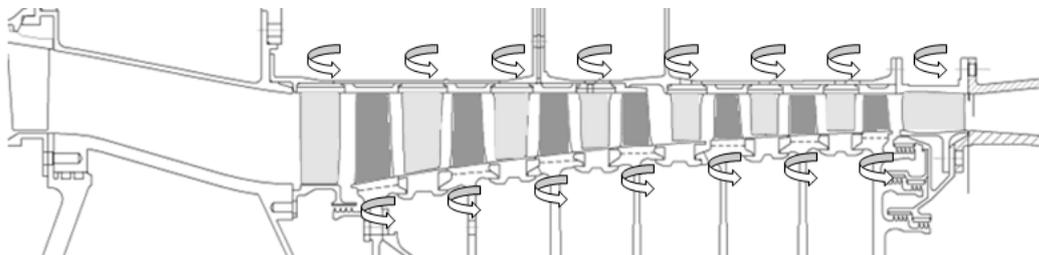


Рис. 2. Варьируемые переменные

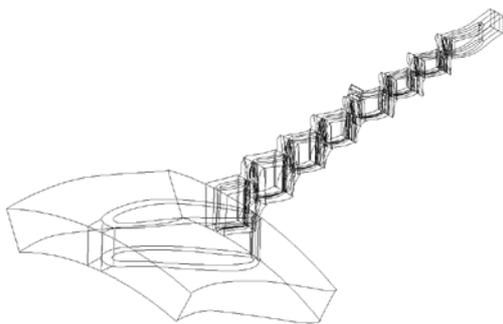


Рис. 3. Расчётная модель КВД

Перед проведением оптимизации была выполнена валидация численной модели КВД путём сравнения расчётных (сплошные линии) и экспериментальных (пунктирные линии) напорных и КПД – характеристик базового КВД

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.

**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.

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.

**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. В результате было получено множество неуправляемых 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).

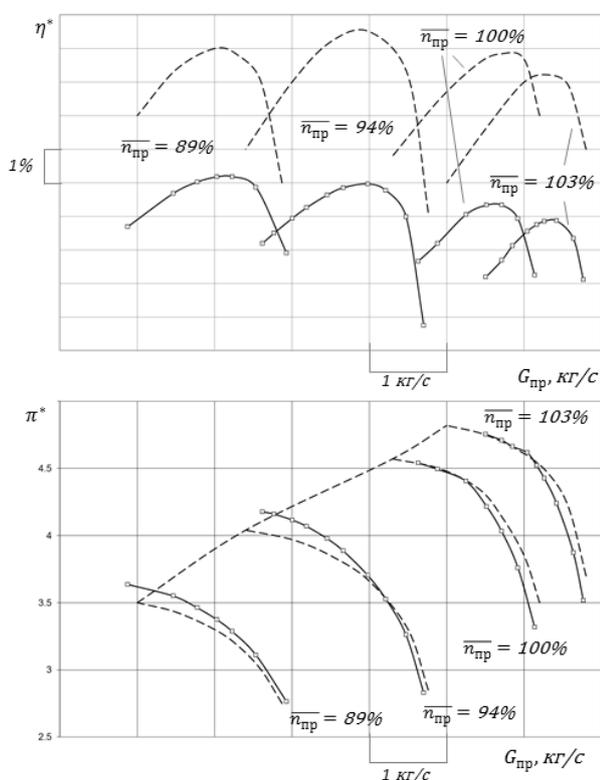


Рис. 4. Валидация расчётной модели КВД

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

**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.

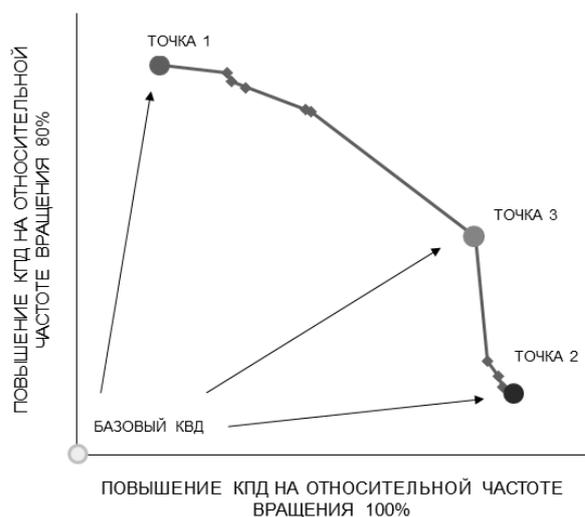


Рис. 5. Множество Парето

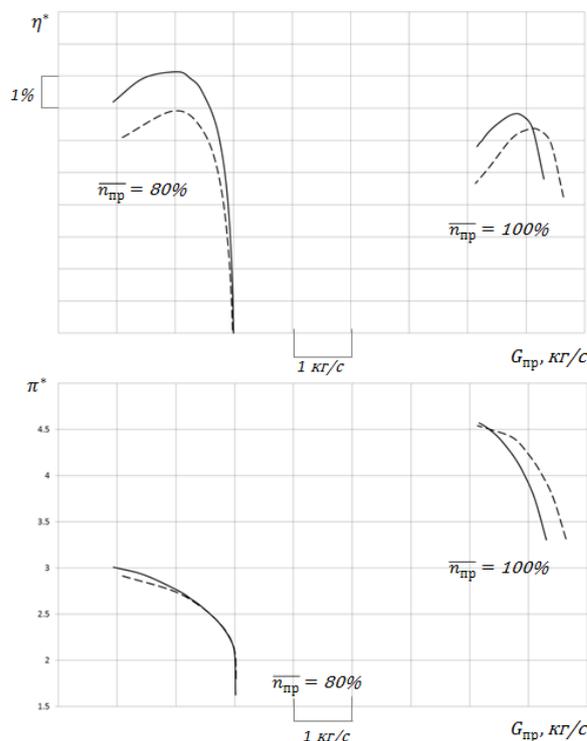


Рис. 6. Сравнение характеристик оптимизированного и базового КВД

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%.

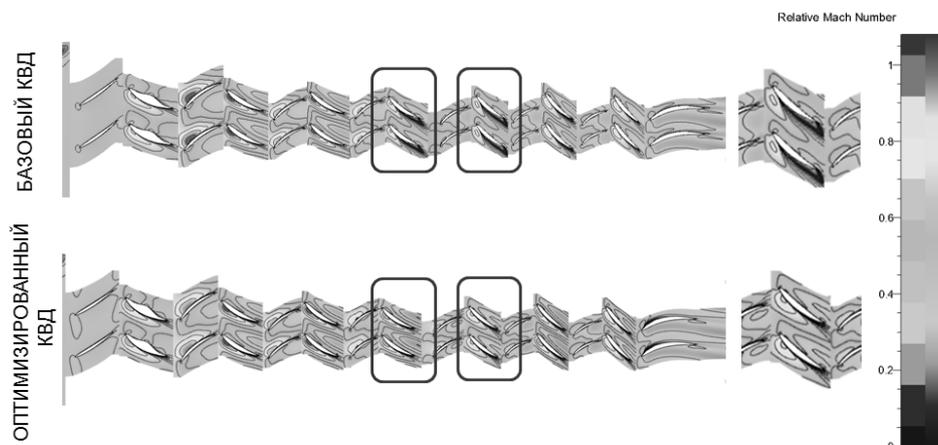


Рис. 7. Поля относительного числа Маха вблизи втулочного сечения базового и оптимизированного КВД

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 четвёртого и пятого рабочих колёс КВД (рис. 7).

**Выводы:** показана возможность использования методов многокритериальной оптимизации и численного газодинамического моделирования для доводки многоступенчатых компрессоров. Создана и верифицирована параметрическая газодинамическая численная модель многоступенчатого компрессора. Практически результатами работы является повышение КПД многоступенчатого компрессора на двух режимах его работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Numeca International [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.numeca.com>
2. "Sigma Technology" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iosotech.com/>
3. Egorov, I.N. Optimization of the gas turbine engine parts using methods of numerical simulation / 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 / И.Б. Дмитриева, Л.С. Шаблюй // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. – Самара, 2011. №3 (27). Ч. 3. С. 106-111.

## INCREASE THE EFFICIENCY OF MULTISTAGE COMPRESSOR BY OPTIMIZATION THE ANGLES OF BLADES INSTALLATION

© 2013 V.N. Matveev<sup>1</sup>, I.N. Egorov<sup>2</sup>, D.A. Kolmakova<sup>1</sup>, G.M. Popov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara State Aerospace University named after acad. S.P. Korolyov  
(National Research University)

<sup>2</sup> JSC "Sigma Technology"

Bi-criteria optimization of high pressure multistage compressor at gas-turbine engine is performed. As optimized parameters the corners of blades installation were used, and as criteria of optimization – peak efficiencies on two rotation frequencies of the compressor was used.

Key words: *numerical model, optimization, multistage compressor*

Valeriy Matveev, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: [tdla@ssau.ru](mailto:tdla@ssau.ru); Igor Egorov, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: [egorov300657@yandex.ru](mailto:egorov300657@yandex.ru); Dariya Kolmakova, Engineer. E-mail: [kolmakova.daria@gmail.com](mailto:kolmakova.daria@gmail.com); Grigoriy Popov, Post-graduate Student. E-mail: [grishatty@gmail.com](mailto:grishatty@gmail.com)