



УДК 621.515

ОПЫТ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

EXPERIENCE IN OPTIMIZATION OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR FLOW PATH

Бубнов Александр Дмитриевич, магистрант каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: alexandrbubnov21@mail.ru

Блинов Виталий Леонидович, к.т.н., старший преподаватель каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vithomukyn@mail.ru

Комаров Олег Вячеславович, к.т.н., доцент каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ov_komarov@mail.ru

Alexander D. Bubnov, Master student, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: alexandrbubnov21@mail.ru

Vitaly L. Blinov, Ph.D. in Engineering, Senior Lecturer, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vithomukyn@mail.ru

Oleg V. Komarov, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ov_komarov@mail.ru

Аннотация: В настоящей работе приведены рекомендации к проведению многокритериальной оптимизации проточной части центробежного компрессора. Разработан пошаговый метод проведения оптимизационных работ.

Abstract: In this paper, recommendations for carrying out multicriteria optimization of centrifugal compressor flow path are given. A step-by-step method of optimization has been developed.

Ключевые слова: центробежный компрессор; проточная часть; многокритериальная оптимизация.

Key words: centrifugal compressor; flow path; multicriteria optimization.

ВВЕДЕНИЕ

Центробежными компрессорами (ЦБК) природного газа называют такие машины, которые предназначены для сжатия и транспортировки природного газа по магистральным газопроводам. Эффективность транспорта газа в том числе зависит от экономичности ЦБК, которая определяется выбором оптимальной формы проточной части (ПЧ). Классические подходы к проектированию центробежных компрессоров базируются на одномерной теории течения газа в проточной части [1, 2], что позволяет достичь лишь определенного уровня эффективности компрессорной машины. Дальнейшее его повышение осуществляется путем применения современных вычислительных методов и многокритериальной оптимизации. Однако стоит учитывать, что данный подход также имеет свои особенности, что в свою очередь предъявляет

более строгие требования к подготовительным процедурам, таким как задание критериев, ограничений выходных параметров и переменных оптимизации, соответствующих конкретной постановке задачи [3 – 10]. Под критериями оптимизации подразумевается изменение (максимизация или минимизация) параметров, определяющих экономичную или надежную работу ЦБК. Совокупность критериев формирует целевую функцию задачи оптимизации. Под ограничениями оптимизации подразумевается задание допустимого диапазона изменения рассчитанных в математической модели параметров, характеризующих работу ЦБК. Под переменными оптимизации – параметры разработанного алгоритма профилирования и проектирования, влияющие на геометрию элементов ЦБК, которые изменяются в процессе оптимизации с целью поиска оптимальной конструкции. В настоящей работе использовалась схема оптимизации, описанная в [3].

ЗАДАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Задание ограничений выходных параметров при постановке оптимизации является важным условием для получения адекватного и наиболее эффективного решения в рамках поставленной задачи. В качестве примера допустим, что при постановке оптимизации геометрии проточной части с заданным критерием оптимизации в виде максимизации политропного КПД компрессора не были наложены ограничения по объемному расходу на входе в ЦБК. В этом случае алгоритм оптимизации найдет оптимальное решение в области меньших объемных расходов, поскольку в этой области доступны наибольшие значения степени сжатия и максимальные значения политропного КПД. В результате такой постановки значение политропного КПД компрессора в исследуемой точке характеристики будет увеличено, но лишь за счет смещение данного режима работы ЦБК вдоль характеристики в область меньших объемных расходов (рис. 1, а), что является корректным решением. В случае наложения ограничений по объемному расходу (рис. 1, б) алгоритм оптимизации найдет решение в заданном диапазоне режимов работы, что позволит увеличить эффективность, не изменяя режим работы для исследуемой точки характеристики. Иначе говоря, КПД компрессора возросло, а степень сжатия и объемный расход остались практически неизменными. Таким образом, при постановке задачи оптимизации следует ответственно подходить к заданию ограничений выходных параметров расчета работы компрессора, поскольку от этого напрямую зависит результат конкретной постановки.

ЗАДАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ОПТИМИЗАЦИИ

Задание переменных оптимизации и диапазона их изменения также является важным этапом постановки оптимизационного исследования. Изначально программный комплекс многокритериальной оптимизации в соответствии с принятым алгоритмом формирует задание на создание нескольких вариантов геометрий ПЧ в включенном в цикл оптимизации профилировщике или проектировщике [2, 3, 9], используя при этом заданные диапазоны переменных оптимизации (зачастую это крайние значения диапазонов). После чего сгенерированные файлы с геометрией передаются в расчетный модуль (в настоящее время широкое применение нашли программные комплексы вычислительной газовой динамики). На основании анализа полученных расчетных данных формируется дальнейшее направление оптимизации. На рисунке 2 представлено множество решений, полученных в результате

одной из постановок оптимизации. По оси абсцисс откладывается номер итерации, а по оси ординат – значение политропного КПД компрессора по статическим параметрам.

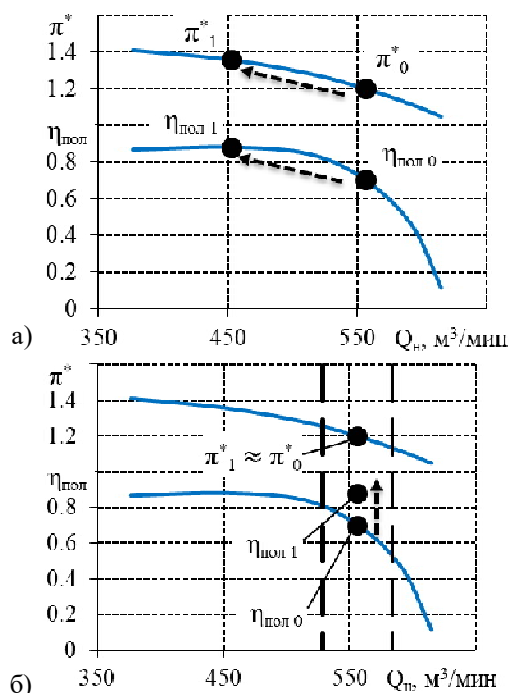


Рис. 1. Результат условной оптимизации без (а) и с (б) ограничением выходных параметров

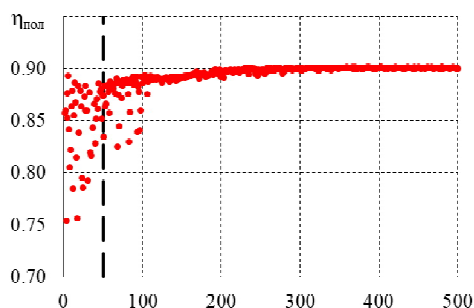


Рис. 2. Множество оптимальных решений

Из рисунка 2 видно, что левее границы обозначенной штриховой линией значения политропного КПД компрессора максимально разбросаны. На этом этапе оптимизатор определяет направление оптимизации (зависит от принятого алгоритма оптимизации). Правее границы разброс значений сокращается, и в итоге значения политропного КПД «ложатся» в линию, т.е. дальнейшее решение задачи не приводит к нахождению геометрии ЦБК, эффективность которой превышала бы ранее найденную оптимальную конструкцию (задачу оптимизации можно считать сошедшейся). Это говорит о том, что в процессе исследования найдено наиболее эффективное решение для выбранного направления оптимизации. Однако, стоит учитывать, что для заданного диапазона

варьирования переменных может существовать несколько направлений оптимизации, которые ведут к нахождению эффективной геометрии. При этом чем шире диапазон изменения переменных оптимизации, тем этих направлений больше. В результате при относительно большом числе переменных оптимизации и широком диапазоне их изменения существует вероятность нахождения не самого лучшего решения в рамках конкретной постановки оптимизации. Аналогичный результат может быть получен и при использовании относительно узкого диапазона варьирования переменных, поскольку изменения между оптимизированной и исходной геометрией будут незначительны. Таким образом, для получения эффективного решения для конкретной постановки оптимизации следует тщательно обосновывать выбор переменных и диапазона их изменения. В некоторых случаях эффективным может оказаться реализация последовательного решения нескольких задач оптимизации, отличающихся друг от друга только типом переменных и диапазоном их варьирования, когда оптимальное решение предыдущей задачи принимается за исходную геометрию ПЧ последующей задачи оптимизации.

ЗАДАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ

Наиболее важным этапом постановки задачи является задание критериев оптимизации. Оптимизационные работы, проводимые при проектировании сменных проточных частей, нацелены на повышение общей эффективности центробежного компрессора, что в свою очередь зачастую определяет выбор критериев оптимизации в виде максимизации политропного КПД компрессора, как по статическим, так и по полным параметрам, а также минимизации температуры газа на выходе из проточной части. Однако общая эффективность ЦБК определяется эффективностью отдельных элементов компрессора (рабочих колес, диффузоров, обратного направляющего аппарата и т.д.) и их согласованной работой. Поэтому при проведении оптимизационных работ имеет смысл применять, как общие, так и частные критерии оптимизации.

Поскольку вся энергия в ступени центробежного компрессора подводится в рабочем колесе (РК), то от того насколько эффективно спроектировано РК напрямую зависит и уровень эффективности всей компрессорной машины. Поэтому при проведении оптимизации рабочих колес компрессора следует в качестве критерия задавать максимизацию политропного КПД РК по полным параметрам. Однако, стоит отметить, что в случае рассогласованности рабочего колеса и лопаточного диффузора (ЛД) даже при максимально эффективном РК диффузор может как бы «задушить» рабочее колесо, что приводит к

существенному снижению эффективности ступени центробежного компрессора. Это объясняется тем, что при рассогласовании РК и ЛД уровень потерь в диффузоре, связанный с обтеканием лопаточной решетки, растет, а следственно снижается эффективность лопаточного диффузора. Поэтому при оптимизации РК имеет смысл в качестве критерия задавать не только максимизацию политропного КПД РК по полным параметрам, но и максимизацию коэффициента повышения статического давления в диффузоре, который в свою очередь характеризует эффективность диффузора.

При проведении оптимизации диффузора следует в качестве критерия выбирать коэффициент повышения статического давления. В случае оптимизации диффузора первой ступени двухступенчатого компрессора имеет смысл в качестве критерия задавать также минимизацию коэффициента потерь полного давления в обратном направляющем аппарате (ОНА), что позволит исключить негативное влияние оптимизированного диффузора на располагающийся за ним ОНА.

На эффективность центробежного компрессора также оказывает влияние и уровень числа Маха M в отдельных элементах проточной части. Приближение числа Маха к единице приводит к резкому изменению характера течения, появлению ударных волн, росту коэффициента потерь. Если перед рассматриваемым элементом проточной части компрессора $M > 1$ или близко к этой величине, то в межлопаточных каналах могут появиться скачки уплотнения, препятствующие увеличению расхода через ступень и вызывающие резкое возрастание потерь напора [1]. Поэтому при оптимизации геометрии ЦБК в некоторых случаях в качестве критерия оптимизации может быть задана минимизация значений местного числа Маха элементов проточной части, что в результате позволит снизить потери в отдельных элементах ПЧ и повысить эффективность каждого элемента в отдельности и компрессора в целом.

Помимо перечисленных параметров, в качестве критерия оптимизации также может быть принята равномерность скоростей потока по высоте канала на входе в отдельные элементы проточной части, что обеспечит наиболее оптимальные углы атаки для каждого элемента, а также улучшит обтекание всех лопаточных решеток потоком рабочей среды, повысив тем самым эффективность центробежного компрессора.

Зачастую количество задаваемых критериев в специализированных программных комплексах многокритериальной оптимизации ограничено,

что не позволяет задать все частные критерии в одной постановке оптимизации. Кроме того, снижение числа критериев оптимизации упрощает решение задачи и способствует более быстрому нахождению оптимального решения.

Эффективным в ряде случаев может стать пошаговый подход к проведению оптимизации ПЧ ЦБК. Пошаговая процедура подразумевает решение последовательных задач оптимизации конкретных элементов ЦБК. При этом в каждой задаче задаются собственные частные критерии оптимизации и один или несколько общих критериев, а параметры, принимаемые в качестве критериев в последующей постановке, задаются в качестве ограничений текущей оптимизации. Такой подход к проведению оптимизации ПЧ ЦБК позволяет избежать ухудшения характеристик уже оптимизированных элементов при последующих постановках, тем самым обеспечивая максимально эффективное решение задачи оптимизации. Однако, недостатком такого подхода является то, что с каждой последующей постановкой оптимизации количество ограничений выходных параметров увеличивается.

При решении задачи оптимизации большое внимание следует уделить верификации математической модели работы ЦБК. Верный выбор критериев оптимизации будет также зависеть от достоверности получаемых данных от математической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задание критериев, переменных и ограничений оптимизации во многом определяет полученный результат решения задачи. Таким образом, постановка задачи оптимизации сама по себе является предметом оптимизационного исследования, результатом которого выступает окончательная схема оптимизации, позволяющая в наименьшие сроки и с минимальными затратами ресурсов получить наиболее оптимальное решение. В зависимости от особенностей объекта и целей оптимизации ее схема может значительно отличаться.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ден Г.Н. Проектирование проточной части центробежных компрессоров: Термодинамические расчеты. – Л: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 232 с., ил.
2. Бубнов А.Д., Винтер М.Ю., Блинов В.Л., Комаров О.В. Проектирование проточной части центробежного нагнетателя природного газа // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы IV российской молодежной

научной школы-конференции. В 2 т. – Томск: Изд-во ООО «ЦРУ», 2016. Т. 2. С. 235 – 238.

3. Бубнов А.Д., Винтер М.Ю., Блинов В.Л., Комаров О.В. Проектирование и многокритериальная оптимизация проточной части центробежного газового компрессора // Наука. Технологии. Инновации / Сборник научных трудов в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Часть 2. С. 71 – 73.

4. Бубнов А.Д., Винтер М.Ю., Блинов В.Л., Комаров О.В. Определение оптимальной густоты лопаточного аппарата центробежного компрессора // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 95 – 98.

5. Бубнов А.Д., Винтер М.Ю., Блинов В.Л., Комаров О.В. Оптимизация формы лопаточного аппарата рабочих колес центробежного газового компрессора // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2017. – Вып. 21. – Ч. V. С. 22 – 24.

6. Бубнов А.Д., Блинов В.Л., Комаров О.В. Оптимизация обратного направляющего аппарата центробежного компрессора // Вторая научно-техническая конференция молодых ученых Уральского энергетического института: труды конференции. – Екатеринбург: ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2017. – С 144 – 147.

7. Блинов В.Л., Бродов Ю.М., Седунин В.А., Комаров О.В. Выбор параметров расчетной модели при решении задач многокритериальной оптимизации плоских компрессорных решеток // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. - №1. – С. 36 – 42.

8. Блинов В.Л., Бродов Ю.М., Седунин В.А., Комаров О.В. Параметрическое профилирование плоских компрессорных решеток при решении задач многокритериальной оптимизации // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. - № 3 – 4. – С. 86 – 95.

9. Blinov V.L., Komarov O.V., Sedunin V.A. Application of optimization techniques for new high-turning axial compressor profile topology design // Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, GT 2014, Dusseldorf, Germany, 16 June 2014 through 20 June 2014. – Volume 2B, GT2014-25379. – P. 1 – 9.

10. Blinov V.L., Komarov O.V., Sedunin V.A., Serkov S. A. Optimization approach and some results for 2d compressor airfoil // International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, December 2016, Volume 8, Number 3, P. 39 – 46.