

УДК 621.165+621.438

С.В. ЕРШОВ, В.А. ЯКОВЛЕВ

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина

МНОГОРЕЖИМНАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ ЛОПАТОЧНЫХ АППАРАТОВ ТУРБИН

Описан подход к многорежимной аэродинамической оптимизации лопаточных аппаратов многоступенчатых турбин. Технология исследований базируется на использовании трехмерных моделей расчета вязкого течения в проточных частях турбомашин и метода оптимизации, построенного на основе гибридизации генетического алгоритма и методов прямого поиска. В качестве функции цели выбирается взвешенный КПД для всех режимов работы турбины. Приведен пример многорежимной оптимизации последней ступени ЦНД паровой турбины мощностью 200 МВт. Для полученной в результате оптимизации конструкции с саблевидными направляющими лопатками на всех рассматриваемых режимах отсутствует отрыв потока в корневых сечениях лопаток рабочего колеса.

Ключевые слова: лопаточный аппарат, турбина, пространственное профилирование, трехмерное вязкое течение, многорежимная оптимизация

Введение

В последние 10-15 лет задачи оптимального проектирования проточных частей турбомашин с использованием средств CFD привлекают повышенное внимание исследователей и проектировщиков [1 – 3]. С помощью такого подхода удается выполнять полное профилирование лопаточных аппаратов и создавать принципиально новые проточные части. Однако, несмотря на эффективность получаемых решений, реализация этого подхода сопряжена с рядом трудностей. Полное перепроектирование проточной части требует мультидисциплинарного подхода и приводит к чрезмерным финансовым затратам. Так как варьируется большое количество геометрических параметров, то и вычислительные затраты будут огромными, и исследования придется проводить на многопроцессорных суперкомпьютерах. Кроме того, для выбора физически правдоподобного оптимального решения часто возникает необходимость в дополнительных ограничениях, которые не всегда могут быть строго обоснованы и часто вводятся для того, чтобы устранить вычислительные погрешности, присущие методам CFD.

В тоже время часто стоит задача не разработки принципиально новой проточной части турбомшины, а модернизации уже существующей. В этом случае всегда имеется прототип конструкции, который может быть достаточно эффективным. При этом подразумеваются такие изменения лопаточных аппаратов, которые не будут приводить к изменению основных размеров проточной части. Затраты на проведение такой модернизации могут быть зна-

чительно ниже, чем потребовало бы полное перепроектирование конструкции. При таком подходе основным резервом повышения экономичности ступеней турбомашин является использование пространственного профилирования лопаток, а именно окружной и осевой саблевидности направляющих лопаток, переменной по высоте лопатки крутки направляющих и рабочих лопаток. В работе [4] данный подход был реализован. В настоящей статье рассматривается его дальнейшее развитие.

1. Постановка задачи и методы расчета

Для решения задачи аэродинамического совершенствования лопаточных аппаратов проточных частей турбомашин используются следующие методологические принципы:

- использование 3D моделей расчета течения вязкого газа для оценки степени аэродинамического совершенства проточной части;
- применение эффективных методов оптимизации, в том числе гибридных подходов;
- использование прототипов конструкций, на базе которых осуществляется поиск усовершенствованной конструкции;
- выбор относительно небольшого набора параметров, изменение которых позволяет управлять пространственной формой лопатки (при этом геометрическая форма профилей лопаток в заданных сечениях остается неизменной);
- проведение аэродинамических расчетов на сетках с различной степенью разбиения (относительно грубых на итерационных шагах процесса оп-

тимизации и мелких для проверки и уточнения полученного решения).

Задача оптимизации пространственной формы лопаток проточной части турбины, состоящей из одной или нескольких ступеней, формулируется следующим образом: найти экстремум функции цели при ограничениях, накладываемых на режим течения и изменяемые геометрические параметры. Изменение пространственной формы лопаток осуществляется за счет согласованного варьирования их геометрических параметров. При этом выбираются не абсолютные значения параметров, а относительные отклонения от исходной конструкции. Принимается, что эти отклонения либо постоянные вдоль пера лопатки, либо распределены по линейному или квадратичному закону. Условие постоянства режима течения обеспечивается путем введения ограничения на изменение расхода рабочего тела. Кроме того, дополнительные ограничения могут быть выставлены на абсолютный тангенциальный угол выхода потока из проточной части и степень реактивности ступени. Статическая прочность обеспечивается применением прочностных ограничений, рассчитываемых на основе использования стержневой модели лопатки.

Для проведения оптимизационных исследований применяются математические методы локальной оптимизации (метод деформированного многогранника Нелдера-Мида [5], метод Торкзон [6]), глобальной оптимизации (генетический алгоритм [7]), а также методы, основанные на идеях гибридизации (комбинация генетического алгоритма и методов прямого поиска).

Расчеты трехмерного течения выполняются с помощью CFD солвера FlowER, в котором реализована численная модель трехмерного вязкого течения, построенная на основе решения системы нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS). Для моделирования турбулентных эффектов применяется двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности $k-\omega$ SST [8]. Численное решение системы дифференциальных уравнений выполняется с использованием неявной квазилинейной ENO-схемы второго порядка аппроксимации.

2. Аэродинамическая оптимизация последней ступени ЦНД паровой турбины

С помощью разработанного подхода выполнена численная оптимизация целого ряда турбинных ступеней. Во всех случаях удавалось добиться повышения КПД проточной части. Ниже приведены результаты многорежимной оптимизации последней

ступени паровой турбины.

При оптимизации последних ступеней мощных паровых турбин целевая функция должна учитывать переменный режим работы ступени. Поэтому для решения задачи многорежимной оптимизации в качестве функции цели выбран взвешенный КПД ступени с весовыми коэффициентами, соответствующими времени работы турбины на различных режимах ее нагрузки

$$\eta = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \eta_i, w_i = \frac{t_i}{\sum_{k=1}^n t_k}, i = 1 \dots n, \quad (1)$$

где η_i – КПД ступени на i -м режиме; w_i – весовой коэффициент для i -го режима; t_i – время работы турбины на i -м режиме; n – число различных режимов работы турбины за рассматриваемый промежуток времени.

В качестве объекта исследования рассмотрена последняя ступень одной из модификаций ЦНД паровой турбины К-200–130, работающая на четырех основных режимах (табл. 1). Выбор весовых коэффициентов w_i для целевой функции (1) опирался на публикации по оценке и анализу работы ЦНД мощных паровых турбин в условиях работы конкретных электростанций Украины [9, 10]. Форма лопаток направляющего аппарата (НА) показана на рис. 1.

Таблица 1

Режимы работы последней ступени ЦНД паровой турбины К-200–130

Режим	1	2	3	4
Противодавление, Па	12300	8000	5000	3500
Весовой коэффициент	0,33	0,33	0,17	0,17

Предварительные расчеты трехмерного вязкого течения в исследуемой ступени на всех четырех режимах показали, что в корневых сечениях реактивность ступени очень мала. Это приводит к отрыву потока в прикорневых сечениях на стороне разрежения РК для всех режимов работы (рис. 2, а; 3, а) и соответственно недостаточной эффективности ступени.

Оптимизация проводилась по семи параметрам, шесть из которых относились к НА:

- угол установки лопатки;
- крутка лопатки (угол поворота каждого сечения относительно корневого в плоскости сечения) с линейным законом распределения по высоте;
- угол осевой саблевидности на периферии;
- длина осевой саблевидности на периферии;
- угол окружной саблевидности у корня;
- длина окружной саблевидности у корня;

и один к рабочему колесу – угол установки рабочей лопатки.

Помимо прямых ограничений на параметры накладывалось ограничение на изменение расхода рабочего тела.

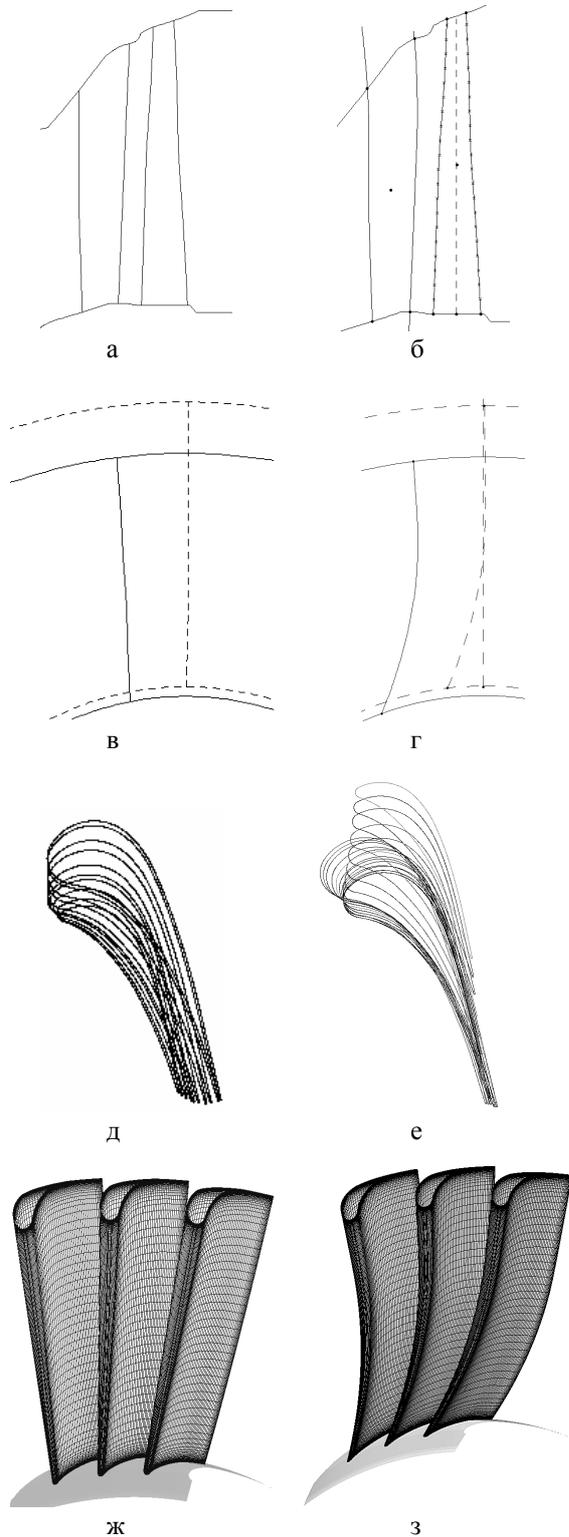


Рис. 1: Форма лопаток НА исходной (а, в, д, ж) и модифицированной (б, г, е, з) ступеней:
 а, б – меридиональное сечение;
 в, г – поперечное оси вращения сечение;
 д, е – набор сечений лопатки НА;
 ж, з – трехмерное изображение лопаток НА

Оптимизация выполнялась с помощью гибридного метода, построенного на базе последовательного подхода: поиск окрестности глобального экстремума осуществлялся с помощью генетического алгоритма на сетке первого уровня разбиения (11880 ячеек в одном канале), а уточнение его положения проводилось методом Нелдера-Мида на сетке второго уровня разбиения (95040 ячеек). Проверочные расчеты выполнялись на сетке третьего уровня разбиения (760320 ячеек). В результате оптимизации наиболее существенно изменились параметры, характеризующие саблевидность лопатки НА:

- угол осевой саблевидности на периферии – $6,7^\circ$ при длине участка саблевидного искривления $0,4$ высоты лопатки;
- угол окружной саблевидности у корня $24,3^\circ$ при длине участка саблевидного искривления $0,6$ высоты лопатки.

Угол установки лопатки РК изменился на $2,7^\circ$, а изменение параметров угла установки и крутки лопатки НА оказалось менее $1,0^\circ$.

Форма лопаток усовершенствованной ступени приведена на рис. 1, а; 2, б и 3, б показана структура течения в канале рабочего колеса.

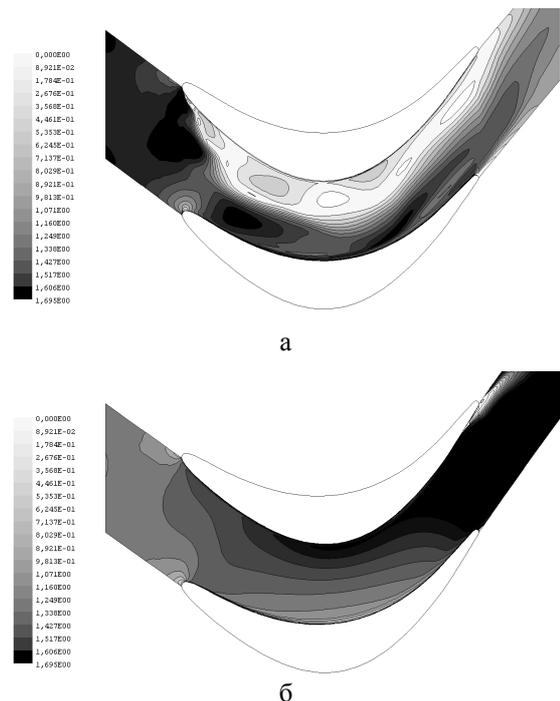


Рис. 2: Изолинии чисел Маха в прикорневом сечении рабочего колеса:
 а – исходная конструкция;
 б – модифицированная конструкция

Видно, что по сравнению с исходной конструкцией, устранен отрыв потока и существенно уменьшены радиальные перетекания. Эти измене-

ния вызваны повышением степени реактивности у корня, обусловленным саблевидной формой усовершенствованной лопатки НА. В целом структура течения в ступени улучшилась. В результате уменьшились потери кинетической энергии, и повысился КПД ступени. График КПД для различных режимов приведен на рис. 4. Здесь же даны зависимости, полученные для исходной конструкции и результаты однорежимной оптимизации [11], выполненной на режиме 2.

Следует отметить, что в обоих исследованиях – как при однорежимной, так и при многорежимной оптимизации получены похожие формы лопаток (с некоторым отличием в параметрах саблевидности). Это объясняется тем, что с одной стороны в этих исследованиях выбирались одинаковые варьируемые геометрические параметры с ориентацией на саблевидные лопатки, а с другой стороны устранение отрывов в корневых сечениях ротора наиболее эффективно достигается увеличением реактивности ступени в прикорневой области рабочей лопатки. Несмотря на небольшое снижение КПД ступени на некоторых режимах по сравнению с однорежимной оптимизацией (рис. 4), осредненный по всем режимам КПД ступени (см. зависимость (1)) повысился на 0,4 %.

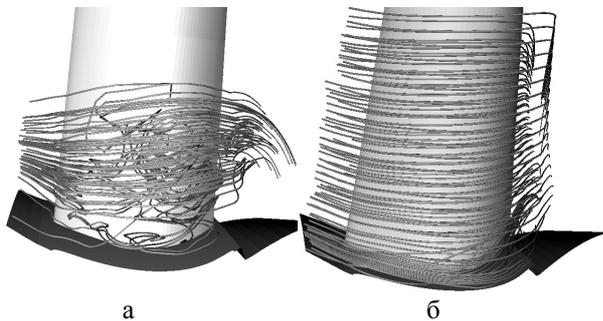


Рис. 3. Линии тока вблизи поверхности разреза лопатки рабочего колеса:

- а – исходная конструкция;
б – модифицированная конструкция

Заключение

Предложен подход к аэродинамической оптимизации пространственной формы лопаток турбин на основе трехмерных моделей расчета течения и выполнен ряд оптимизационных исследований лопаточных аппаратов паровых и газовых турбин. В результате оптимизации турбинных ступеней улучшилось качество обтекания лопаточных венцов за счет уменьшения интенсивности вторичных течений и ликвидации отрывов потока, уменьшились потери кинетической энергии, повысился КПД.

Последовательная гибридизация генетического алгоритма и прямых методов локального поиска по-

казала себя эффективной стратегией оптимизации турбинных ступеней.

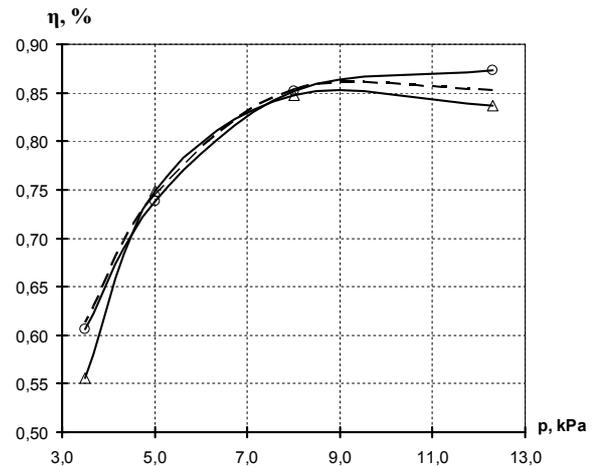


Рис. 4: Зависимость КПД ступени от режимов работы турбины:

- Δ—Δ— — исходная конструкция;
--- — однорежимная оптимизация [11];
—o—o— — многорежимная оптимизация

Проведение 3D расчета течения на достаточно грубых сетках на первых этапах оптимизации при использовании гибридного алгоритма обеспечивает значительное сокращение времени оптимизации. Погрешности нахождения экстремума, вызванные недостаточным разрешением, могут быть уменьшены либо последовательным измельчением сетки в процессе оптимизации, либо применением «предсказателей» типа искусственных нейронных сетей для построения поверхностей отклика, приближенно аппроксимирующих результаты расчетов на мелких сетках, по данным расчетов преимущественно на грубых сетках.

Полученные в результате проведенных исследований результаты продемонстрировали целесообразность и эффективность применения предложенного подхода к решению задачи пространственного профилирования лопаточных аппаратов и оптимизации проточных частей турбин.

Литература

1. Numerical Optimization Of Turbomachinery Bladings / S. Burguburu, C. Toussaint, C. Bonhomme, G. Leroy // Proceedings of ASME TurboExpo-2003, June 16–19, 2003, Atlanta, Atlanta, Georgia, USA, GT2003-38310. – 11 p.
2. Demeulenaere A. Three-dimensional inverse method for turbomachinery blading design / A. Demeulenaere, R.V. Braembussche // Computational Fluid Dynamics '96.; Proceedings, 3rd ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conf., J.-A. Desideri et al., eds, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England. – 1996. – P. 965–971.

7. Shahpar S. *Three-dimensional Design and Optimization of Turbomachinery Blades using the Navier-Stokes Equations* / S. Shahpar // *ISABE 2001-1053, proceedings of 15th ISABE conference, Bangalore, India, 2001.*

4. Lampart P. *Direct Constrained Computational Fluid Dynamics Based Optimization of Three-Dimensional Blading for the Exit Stage of a Large Power Steam Turbine* / P. Lampart, S. Yershov // *Transactions of the ASME. Journal Engineering for Gas Turbines and Power.* – 2003. – 125, No 1. – P. 385-390.

5. Nelder J.A. *A simplex method for function minimization* / J.A. Nelder, R. Mead // *The Computer Journal.* – 1965. – 7, № 1. – P. 308-313.

6. Torczon V.J. *Multi-Directional Search: A Direct Search Algorithm for Parallel Machines* / V.J. Torczon // *A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy Approved, Rice University, Houston, Texas, 2004.* – 114 p.

7. Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Massachusetts:

Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1989. – 408 p.

8. Menter F.R. *Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications* / F.R. Menter // *AIAA J.* – 1994. – V. 32, № 8. – P. 1598-1605.

9. Оценка эффективности работы ЦНД турбины Т-250/300-23,5 Харьковской ТЭЦ-5 / О.Н. Слабченко, М.В. Зайцев, А.Ю. Козлоков, А.Д. Золотухин // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: сб. научн. трудов.* – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – № 3. – С. 41-48.

10. Зайцев М.В. Выбор варианта паровой турбины в зависимости от условий ее работы / М.В. Зайцев, Е.В. Левченко, Б.А. Аркадьев // *Теплоэнергетика.* – 1996. – № 3. – С. 64-67.

11. Русанов А.В. *Аэродинамическое совершенствование последней ступени цилиндра низкого давления паровой турбины мощностью 200 МВт* / А.В. Русанов, С.В. Ершов, Н.В. Пащенко, В.А. Яковлев // *Пробл. машиностроения.* – 2007. – 10, № 4. – С. 53-61.

Поступила в редакцию 16.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Гнесин, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

БАГАТОРЕЖИМНА АЕРОДИНАМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОСТОРОВОЇ ФОРМИ ЛОПАТКОВИХ АПАРАТІВ ТУРБІН

С.В. Ершов, В.А. Яковлев

Описано підхід до багаторежимної аеродинамічної оптимізації лопаткових апаратів багатоступінчастих турбін. Технологія досліджень базується на використанні тривимірних моделей розрахунку в'язкої течії в проточних частинах турбомашин і методу оптимізації, побудованого на основі гібридизації генетичного алгоритму та методів прямого пошуку. В якості цільової функції обрано зважений ККД ступеня для всіх режимів роботи турбіни. Наведено приклад багаторежимної оптимізації останнього ступеня ЦНТ парової турбіни потужністю 200 МВт. Для отриманої в результаті оптимізації конструкції із шаблеподібними напрямними лопатками на всіх розглянутих режимах відсутній відрив потоку в кореневих перетинах лопаток робочого колеса.

Ключові слова: лопатковий апарат, турбіна, просторове профілювання, тривимірна в'язка течія, багаторежимна оптимізація.

MULTIPOINT AERODYNAMIC OPTIMIZATION OF SPATIAL FORM OF TURBINES BLADE ROWS

S.V. Yershov, V.A. Yakovlev

The approach to multipoint aerodynamic optimization of blade rows of multistage turbines is described. The technology of computational investigations is based on using of 3D viscous flow numerical models for turbomachinery flowpaths and the method of optimization constructed on the basis of hybridization of genetic algorithm and direct search methods. The weighed stage efficiency for all operating conditions of the turbine is chosen as an objective function. The example of multipoint optimization of low pressure cylinder last stage of the steam turbine by capacity of 200 MW is considered. For the design received as a result of optimization with compound leaned stator blades a separation near root sections of rotor blades is absent for all considered modes.

Key words: blade row, turbine, spatial blade design, three-dimensional viscous flow, multipoint optimization.

Ершов Сергей Владимирович – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: yershov@ipmach.kharkov.ua.

Яковлев Виктор Андреевич – научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: yava@ipmach.kharkov.ua.