

УДК 621.515.1

Г. А. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук, проф.; проф. СумГУ, Сумы;
И. В. ЮРКО, аспирант СумГУ, Сумы

ПРИМЕНЕНИЕ БЛОЧНО ИЕРАРХИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ВРА ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

В статье представлены результаты оптимизации системы входного регулирующего аппарата (ВРА). Использован блочно-иерархический подход к проектированию. Приведен алгоритм последовательного разбиения глобальной задачи оптимизации на несколько локальных. На каждом иерархически подчиненном уровне, на основании проведения численных исследований, составлялась формальные макромодели объекта. Использование полученных формальных макромоделей позволяет спроектировать оптимальную систему ВРА, которая обеспечивает эффективное регулирование компрессорной установки в широком диапазоне работ.

Ключевые слова: центробежный компрессор, регулирование, система ВРА, лопаточная решетка, оптимизация, формальное макромоделирование.

Введение. Современное требование, предъявляемое к центробежным установкам, заключается в обеспечении необходимых параметров газа в широком диапазоне изменения производительности (расходов). Однако до сих пор традиционным подходом к проектированию является определение оптимальных конструктивных параметров для расчетного режима работы. Резерв в повышении КПД всей установки кроется в учете изменения характеристик установок на нерасчетных режимах (при помощи элементов регулирования) уже на стадии проектирования. Заранее можно только приблизительно определить характер будущей загрузки. Все эти особенности работы необходимо учитывать при проектировании всей компрессорной установки в целом.

Конструктивная схема типичного современного турбокомпрессора представлена на рис. 1.

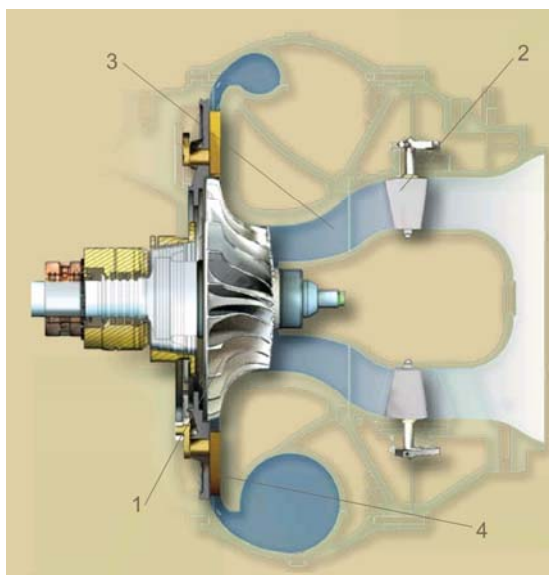


Рис. 1 – Современный вид воздушного центробежного компрессора: 1 – осерадиальное колесо; 2 – направляющий лопаточный аппарат; 3 – кольцевой подводящий канал; 4 – лопаточный диффузор

© Г.А. Бондаренко, И.В. Юрко, 2014

Одним из эффективных способов регулирования стационарных центробежных компрессоров является использование входных регулирующих аппаратов (ВРА) с поворотными лопатками. Для достижения требуемого эффекта регулирования (по уравнению Эйлера) необходимо создать закрутку потока перед колесом. Поскольку закрутка создается поворотными лопатками ВРА, то потери в ВРА и структура потока на выходе из него будет тем хуже, чем больше угол поворота лопатки. Углы можно уменьшить, разместив ВРА на радиусе, большем радиуса входа в рабочее колесо компрессора. Но при этом появляется необходимость выполнения подводящего канала. Задача проектирования приобретает многокритериальный оптимизационный характер.

Был введен термин «система ВРА», который под собой подразумевает систему, состоящую из двух элементов: лопаточный аппарат (ЛА) и подводящий канал (ПК). Целесообразность установки лопаточного аппарата на более высоком радиусе вытекает из закона сохранения момента количества движения.

Каждый из элементов системы ВРА выполняет важную роль в обеспечении требуемой закрутки. Лопаточный аппарат создает закрутку потока, которая увеличивается в подводящем канале. Уровень потерь в подводящем канале соотносится с потерями в лопаточном аппарате и поэтому очень важно исследовать течение потока в каждом элементе в отдельности.

Традиционной практикой в турбомашиностроении является использование блочно-иерархического подхода к проектированию и дальнейшей оптимизации системы [1]. Преимущества такого подхода состоят в том, что сложная задача большой размерности разбивается на последовательно решаемые задачи малой размерности. Следует заметить, что на каждом иерархическом уровне используется своя математическая модель, что приводит к появлению иерархии математических моделей проектируемых объектов [2].

Поведение системы в целом обычно оказывается сложнее поведения отдельных частей. Следует отметить, что при переходе с нижнего уровня на верхний, часть информации теряется. Это связано с принципом суперпозиции, когда математическая модель каждого элемента не учитывает влияния вышестоящего уровня на нижестоящий. Поэтому найденное оптимальное значение не будет объективно являться самым оптимальным значением, но будет где-то рядом с этим значением. Подобные особенности неизбежны при традиционном блочно-иерархическом подходе, однако какой-либо приемлемой альтернативы этому подходу при проектировании сложных объектов не существует.

Постановка задачи и объект исследования

Целью данной работы была разработка алгоритма оптимизации системы ВРА для центробежного компрессора. В работе была предпринята попытка создания иерархической схемы компрессорной установки, с разнесением одной глобальной задачи на несколько локальных уровней с применением блочно-иерархического подхода к проектированию.

На каждом иерархически-подчиненном уровне проводилась «локальная» оптимизация параметров с применением набора формальных макромоделей, критериев оптимальности, методов оптимизации, ограничивающих параметров и др. Решая локальные оптимизационные задачи и передавая оптимальные результаты на более высокий иерархический уровень возможно эффективное решение глобальной оптимизационной задачи. На рис. 2. показана структура алгоритма оптимального проектирования и распределение задач между локальными уровнями.

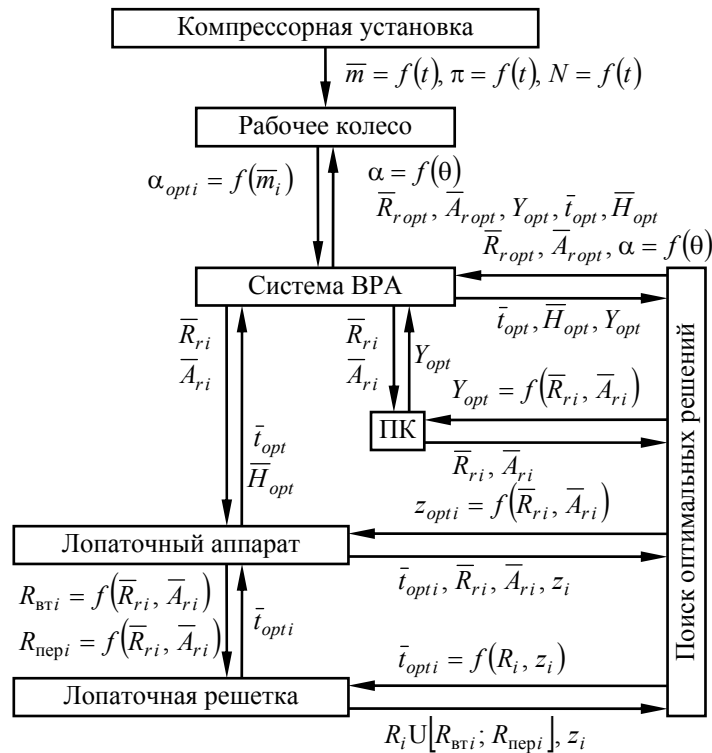


Рис. 2 – Структура алгоритма оптимального проектирования

С верхнего уровня (компрессорная установка) передаются интегральные параметры установки (отношение давлений, расход газа, мощность) а также предполагаемые режимные параметры работы компрессора. На уровне «рабочее колесо (РК)» осуществляется поиск наилучшей его геометрии (частота вращения, диаметры входа и выхода, углы установки лопаток и др.), обеспечивающей требуемые параметры. Это достигается путем использования эмпирических зависимостей и решения обратной задачи. После определения оптимальной геометрии колеса – строятся его газодинамические характеристики в зависимости от режима работы, а также строится график оптимальной закрутки для разных режимов работы. Для обеспечения оптимальной работы центробежной установки в требуемом диапазоне режимов используется система ВРА, состоящая из ПК и ЛА.

На уровне ЛА и ПК проводится поиск оптимальных значений формообразующих параметров, которые обеспечивают минимальные потери и требуемую закрутку во всём диапазоне режимов. Для ПК это форма меридиональных контуров, уклон канала, диаметры входа и выхода. Для ЛА это оптимальное значение относительного шага решетки и относительной высоты решетки, форма профиля лопатки. Между уровнями осуществляется рекурсивный информационный обмен, в результате чего с нижнего уровня передаются только оптимальные значения на верхний уровень. Когда найдены оптимальные параметры на уровне «система ВРА», производится расчет интегральных параметров и газодинамических характеристик компрессора при закрутке потока на входе.

Рассмотрим подробнее каждый из иерархических уровней.

Уровень «Рабочее колесо»

Рабочее колесо центробежного компрессора является главным элементом всей системы, так как именно в нем происходит процесс передачи энергии. На этом уровне

главным этапом является построение газодинамических характеристик. Снижение КПД при уменьшении производительности является следствием неблагоприятного обтекания входной кромки лопатки из-за больших углов атаки. Закручивая поток перед входом в колесо, можно добиться режима безударного натекания (см. рис. 3).

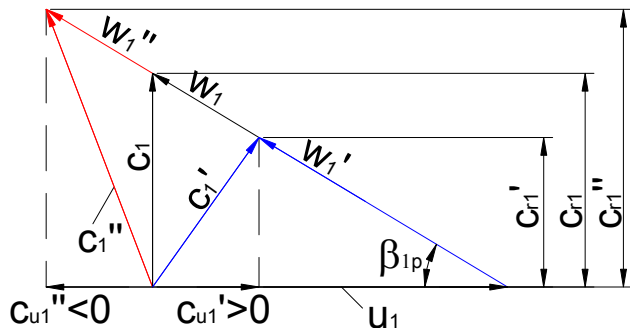


Рис. 3 – Треугольники скоростей при разной закрутке на входе в РК

рассмотрении системы ВРА с добавлением подводящего канала, закон закрутки может приближаться к $c_{u1}r = \text{const}$. Выбор закона закрутки является не тривиальной задачей и представляет собой отдельную многопараметрическую оптимизационную задачу. В первом приближении можно задаться законом закрутки $\alpha = \text{const}$. Важно учитывать, что чем меньше угол атаки – тем больше КПД колеса. Обеспечение безударного натекания (или близкого к такому) на периферии приоритетнее, чем у втулочной поверхности, поскольку на периферии происходит бóльшая передача энергии и протекает бóльший массовый расход.

Выбрав закон закрутки, была поставлена задача определения оптимальных углов натекания потока, которые обеспечили бы максимальное значение КПД рабочего колеса на требуемом режиме работы по производительности.

Данная задача относится к классу однокритериальных, однопараметрических с ограничениями. Наиболее эффективным способом решения такого класса задач является «метод золотого сечения» [3]. На скорость поиска оптимального значения этим методом напрямую зависит начальный диапазон входной переменной, в котором необходимо проводить поиск оптимального значения

$$L_n = \frac{L}{\varphi^{n-1}},$$

где L_n – диапазон неопределенности после n -ой итерации; L – начальный диапазон неопределенности; n – номер итерации; $\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,618$ – пропорция золотого сечения. Таким образом, длина интервала неопределенности на каждом шаге сжимается с коэффициентом 0,618.

Чем интервал неопределенности будет меньше, тем меньше итераций требуется для поиска оптимального значения. А поскольку газодинамический расчет с использованием вычислительных комплексов порой требует больших временных затрат – правильный выбор начального интервала является очень важной задачей.

Данный алгоритм оптимизации может быть усовершенствован, путем создания нейронных сетей, которые последнее время получают всё большие сферы применения, в частности в компрессоростроении. Так, например, данные полученные при поиске

Следует отметить, что на входе в рабочее колесо угол лопаток различен и следовательно, теоретически, для каждого радиуса требуется своя закрутка (свой угол установки лопаток ВРА). Поэтому важным этапом является выбор закона закрутки во входном регулирующем аппарате. Сам по себе лопаточный аппарат, в силу своих конструктивных особенностей обеспечивает закрутку по закону близкому к $\alpha = \text{const}$. При

оптимальных значений на локальных уровнях (история поиска) могут быть использованы для построения нейронной сети, которая эффективнее описывает взаимосвязь между параметрами, чем регрессионные зависимости.

Последовательность определения оптимальных углов выхода необходимо начинать с номинального значения, для которого $\alpha = 0^\circ$ и дальше постепенно смещаться в сторону меньших расходов, принимая минимальное значение нового диапазона, равным оптимальному значению для предыдущего расхода.

Результатом оптимизации на данном этапе является график (см. рис. 4) зависимости оптимальных среднеинтегральных углов потока на входе от производительности компрессора $\alpha_{opt i} = f(\bar{m}_i)$.

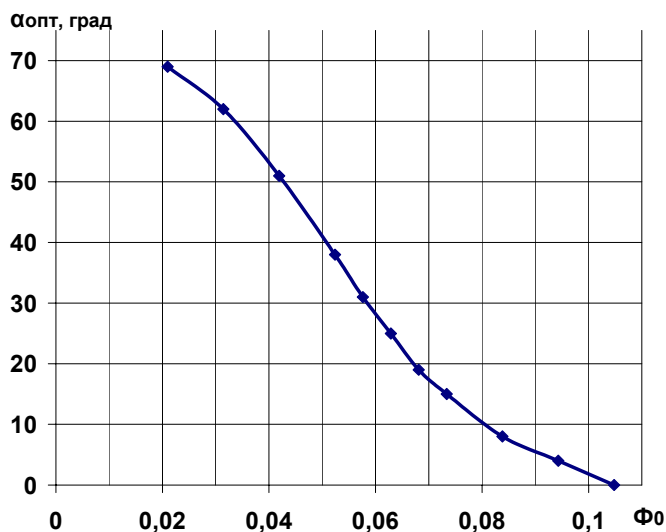


Рис. 4 – Зависимость оптимальных углов потока на входе от производительности [4]

На данном этапе, при определении максимального КПД колеса, никак не учитывались потери энергии в системе ВРА, которые важно сократить до минимума при обеспечении оптимального угла потока.

Исходя из этого положения, вытекает цель оптимизации для следующего иерархического уровня (уровень «система ВРА») – минимизация потерь энергии в системе ВРА при обеспечении требуемой закрутки на входе в рабочее колесо.

Для решения оптимизационных задач на нижних локальных уровнях необходимо определиться,

в каком диапазоне и с какой продолжительностью по времени планируется работа компрессора. Именно в этом диапазоне и должна проводиться дальнейшая оптимизация.

Исходная система ВРА

Как было сказано выше, современная система ВРА состоит из подводящего канала и лопаточного аппарата. Целевой функцией на этом уровне является минимизация потерь в системе ВРА. Эта цель достигается двумя способами: 1) уменьшением угла установки лопаточного аппарата за счет поднятия его на более высокий радиус; 2) совершенствованием профиля и основных геометрических характеристик решетки (относительный шаг, относительная высота). Максимальный выигрыш в оптимизации имеет место при одновременном достижении обеих целей.

Подводящий канал

Основная роль подводящего канала – увеличение закрутки потока после лопаточного аппарата. Авторами предложена методика проектирования подводящего канала с применением Кривых-Безье [5]. Основными формообразующими параметрами подводящего канала являются: отношение средних радиусов входа к выходу

$$\bar{R}_r = \frac{R_{0cp}}{R_{1cp}}, \text{ отношение площадей } \bar{A}_r = \frac{A_0}{A_1}, \text{ уклон канала } \bar{Y} = \tan \gamma = \frac{R_{0cp} - R_{1cp}}{L}$$

(см. рис. 5а). Чем больше значение параметра \bar{R}_r , тем сильнее поток закручивается

после лопаточного аппарата. Однако повышение этого параметра приводит к увеличению протяженности канала и соответственно увеличению потерь на трение.

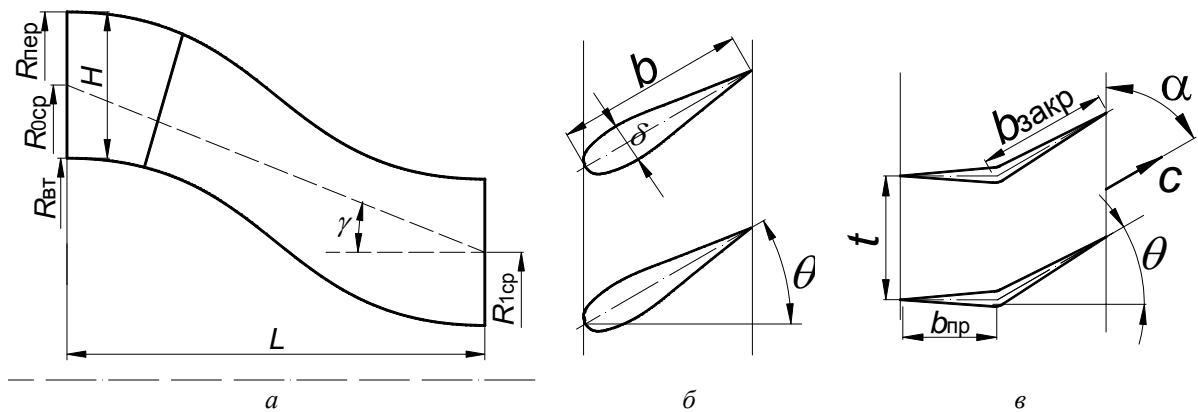


Рис. 5 – Система ВРА: а – подводящий канал; б – сплошная решетка; в – составная решетка

Так как заранее не известна величина оптимальных параметров \bar{R}_r и \bar{A}_r , необходимо провести параметрическое исследование для ряда значений и найти для каждого сочетания \bar{R}_r и \bar{A}_r из этого ряда оптимальное значение уклона \bar{Y} , при котором потери в ПК были бы минимальными. Поиск оптимального значения уклона осуществляется с применением метода золотого сечения, начиная с самых минимальных значений \bar{R}_r и \bar{A}_r .

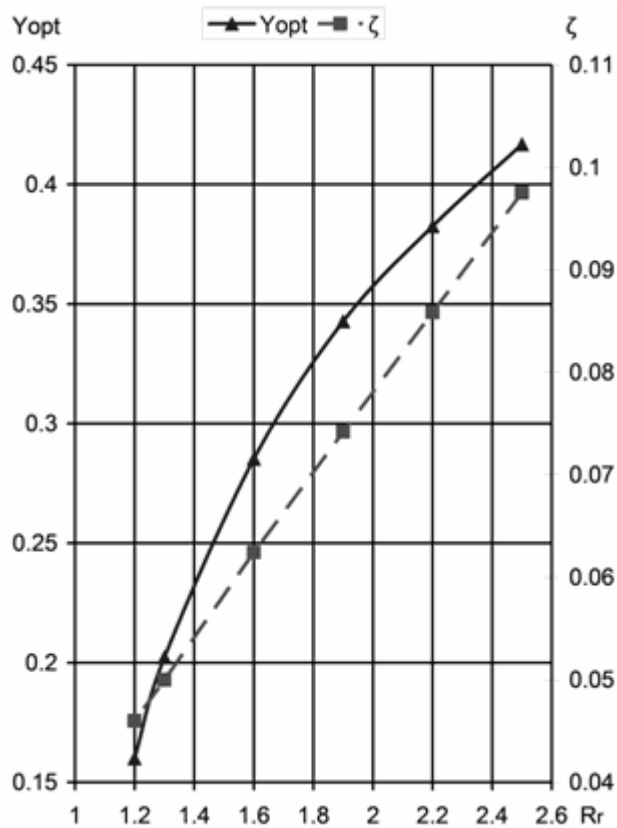


Рис. 6 – График зависимости оптимального уклона \bar{Y}_{opt} от параметра \bar{R}_r

Результатом оптимизации на данном этапе является график зависимости оптимального уклона от формообразующего параметра \bar{R}_r (см. рис. 6), а так же поверхность отклика вида $\bar{Y}_{opt i} = f(\bar{R}_{ri}, \bar{A}_{ri})$.

Потери энергии в ПК будут тем меньше, чем меньше параметры \bar{R}_r и \bar{A}_r . Однако увеличение параметра \bar{R}_r позволяет уменьшить потери в лопаточном аппарате. Для корректной оценки и итогового выбора оптимальных параметров \bar{R}_r и \bar{A}_r необходимо определить потери энергии в лопаточном аппарате. На этом этапе осуществляется переход на следующий иерархический уровень – «Лопаточный аппарат».

Исходный лопаточный аппарат

Так как заранее не известны оптимальные значения параметров \bar{R}_r и \bar{A}_r – необходимо производить

параметрические исследования для ряда тех же значений \bar{R}_r , что и на предыдущем этапе. Формообразующий параметр \bar{R}_r четко диктует высоту лопаточной решетки, однако выбор количества лопаток и относительного шага решетки является оптимизационной задачей.

Эта задача может эффективно решиться, если задачу поиска оптимального относительного шага «спустить» на иерархически-подчиненный уровень и использовать квазитрехмерный подход. В рамках цилиндрической теории, 3-х мерная лопатка представляется как набор сечений малой толщины. Расчет проводится для ряда сечений, расположенных на различных радиусах R_i . При этом трение потока между слоями в расчете не учитывается, т.е. определяются только кромочные потери, потери на трение и вихреобразование. Данная задача оптимизации осуществлялась на уровне «Лопаточная решетка»

Лопаточная решетка

В компрессоростроении существует 2 направления при выборе типа лопаточных решеток: 1) использование сплошных лопаток аэродинамической формы (см. рис. 5б); 2) использование составных лопаток, состоящих из предкрылка и закрылка (см. рис. 5в). Форма составных лопаток может быть различная. Составные лопаточные решетки обладают преимуществом по сравнению со сплошными [6]. Благодаря наличию предкрылка обеспечивается более равномерное натекание на поворотную часть составной лопатки. Однако не всегда представляется возможным установка составных лопаток, поэтому выбор типа лопаточной решетки является важной задачей, которая должна решаться на отдельном иерархическом уровне.

После выбора типа лопаточной решетки формулируется оптимизационная задача для данного иерархического уровня: для ряда значений радиуса установки лопаточной решетки R_i и ряда чисел лопаток z требуется найти такое значение хорды лопаток b_{opt} , которое обеспечило бы минимальное значение коэффициента потерь энергии, при этом сохранив величину закрутки в заданном интервале. Для поиска оптимальных длин хорд используется метод золотого сечения. Наибольший интерес представляет поиск оптимального значения хорды b_{opt} для угла установки лопаток $\theta = 60^\circ$, так как именно при больших углах атаки наблюдаются существенные потери, связанные с отрывом потока.

Результатом оптимизации на данном этапе является график зависимости оптимального относительного шага \bar{t}_{opt} и величины профильных потерь решетки, от параметра R_i/z (см. рис. 7). Исходя из теории подобия – данный график позволяет обобщить полученные результаты на другие радиусы установки и разное число лопаток путем простого пересчета.

После поиска оптимальных значений относительного шага решетки для ряда сечений, эта информация передается на верхний иерархический уровень «Лопаточный аппарат».

Оптимальный лопаточный аппарат

Используя оптимальные значения хорды, можно «набирать» из сечений оптимальную лопатку. Число лопаток необходимо выбирать минимальным, исходя из обеспечения прочности и жесткости механизма вращения лопаточного аппарата. Обобщенно можно сказать, что это условие соответствует значениям относительной высоты лопаток $\bar{H} \geq 0,8$.

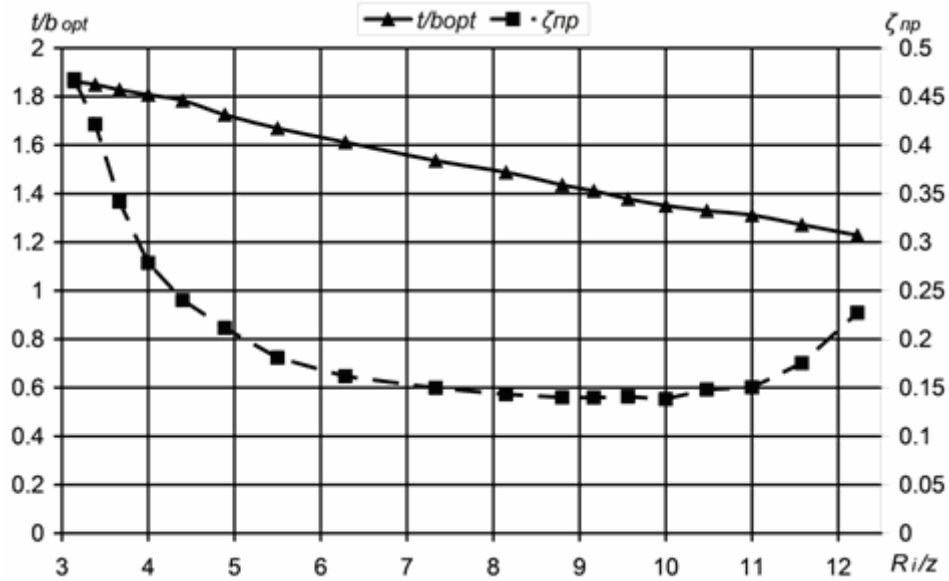


Рис. 7 – Оптимальные значения относительного шага решетки $(t/b)_{opt}$ и профильных потерь $\zeta_{пр}$ энергии (для составного клиновидного профиля)

Выбрав оптимальные геометрические параметры лопаточного аппарата, производится полноценный численный расчет течения для ряда значений \bar{R}_r , с целью определения основных аэродинамических характеристик (коэффициент потерь энергии ζ и угол выхода потока α). Для окончательного выбора формообразующего параметра \bar{R}_r , на заключительном этапе необходимо провести численный расчет системы ВРА в целом, оптимальные параметры которой принимаются с нижних уровней.

Результаты исследования

Итогом многопараметрической оптимизационной задачи является график $\alpha = f(\theta)$ и $\zeta = f(\theta)$, представленный на рис. 8.

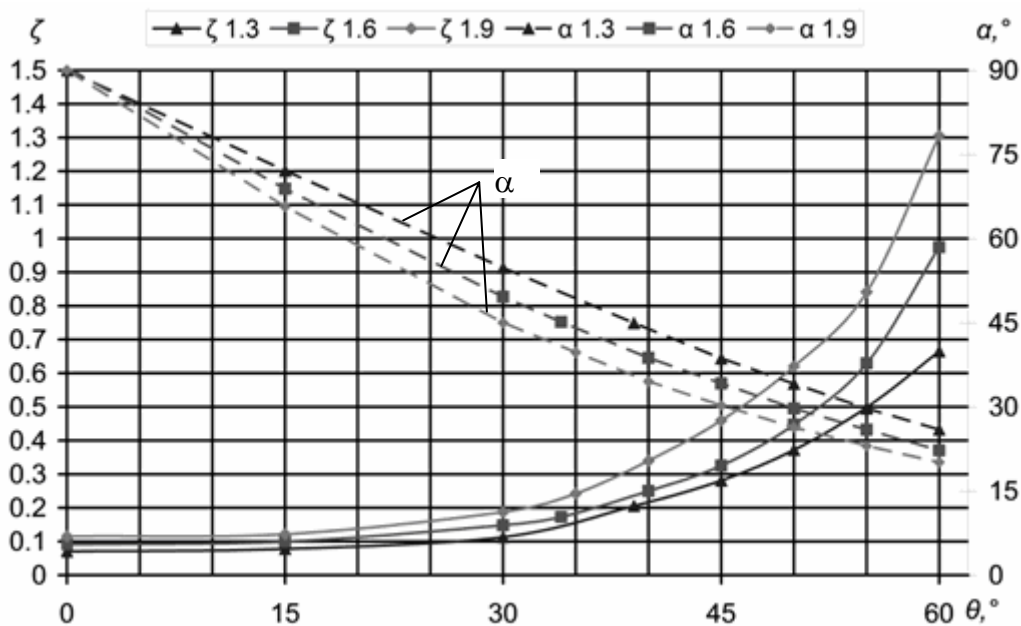


Рис. 8 – Расчетные характеристики системы ВРА

Этот график связывает угол выхода потока α , потери в системе ВРА $\zeta_{\text{ВРА}}$ и угол установки лопаточного аппарата θ . Зная требуемый угол выхода потока, который соответствует конкретной производительности, можно окончательно выбрать оптимальное значение параметра \bar{R}_r . Если же известно, что компрессор работает в определенном диапазоне производительностей, то необходимо найти среднеинтегральную величину требуемой закрутки и затем выбрать параметр \bar{R}_r .

Возвращаясь к уровню «рабочее колесо», проводится численный расчет оптимальной системы ВРА совместно с рабочим колесом центробежного компрессора. В завершении строится газодинамическая характеристика агрегата при разном положении углов установки системы ВРА. Полученные характеристики дополняются линией оптимального регулирования $\alpha_{opti} = f(\bar{m}_i)$, которая была получена на предыдущем этапе.

Вывод. Использование блочно-иерархического подхода к проектированию сложных систем позволяет в короткие сроки осуществлять простое решение многопараметрической оптимизационной задачи. Предложенный алгоритм может быть использован для создания оптимальной конструкции системы ВРА для эффективного регулирования центробежных компрессорных машин.

Список литературы: 1. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин [Текст]: моногр. / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, С. В. Ершов и др. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 355 с.:ил. – ISBN 966-593-228-4. 2. Конструирование и расчет машин химических производств [Текст] / Ю. И. Гусев, И. Н. Карасев, Э. Э. Кольман-Иванов и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с. 3. *Пантелеев, А. В.* Методы оптимизации в примерах и задачах [Текст]: учеб. пособие / А. В. Пантелеев, Т. А. Легова. – 2-е изд., исправл. – М.: Высш. шк., 2005. – 544 с. 4. Метод оптимизации газодинамических характеристик осерадальной компрессорной ступени со входным регулирующим аппаратом [Текст] / Г. А. Бондаренко, И. В. Юрко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 14(988). – С. 49–53. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. 5. Оптимизация параметрической модели входного регулирующего аппарата центробежного компрессора [Текст] / Г. А. Бондаренко, И. В. Юрко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 12(986). – С. 43–49. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. 6. Mohseni, A. Novel IGV designs for centrifugal compressors and their interaction with the Impeller [Электронный ресурс] / A. Mohseni, E. Goldhahn, R. A. Van den Braembussche // Journal of Turbomachinery. – Электрон дан. (1 файл). – 2011. – Vol. 134, No. 2. – 8 p. – Режим доступа: <http://turbomachinery.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleID=1468712>. – Название с экрана. – 12.12.2013.

Bibliography (transliterated): 1. Bojko, A. V., et al. *Ajerodinamicheskij raschet i optimal'noe proektirovanie protochnoj chasti turbomashin*. Kharkov: NTU "HPI", 2002. ISBN 966-593-228-4. Print. 2. Gusev, Ju. I., et al. *Konstruirovanie i raschet mashin himicheskij proizvodstv*. Moscow: Mashinostroenie, 1985. Print. 3. Panteleev, A. V., and T. A. Letova. *Metody optimizacii v primerah i zadachah*. Moscow: Vyssh. shk., 2005. Print. 4. Bondarenko, G. A., and I. V. Jurko. "Metod optimizacii gazodinamicheskij harakteristik oseradial'noj kompressornoj stupeni so vhodnym regulirujushhim apparatom." *Visnyk NTU «HPI». Serija: Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja*. No. 14(988). Kharkiv: NTU «HPI», 2013. 49–53. ISSN 2078-774X. Print. 5. Bondarenko, G. A., and I. V. Jurko. "Optimizacija parametricheskoj modeli vhodnogo regulirujushhego apparata centrobezhnogo kompressora." *Visnyk NTU «HPI». Serija: Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja*. No. 12(986). Kharkiv: NTU «HPI», 2013. 43–49. ISSN 2078-774X. Print. 6. Mohseni, A., R. A. Van den Braembussche, J. R. Seume and E. Goldhahn. "Novel IGV designs for centrifugal compressors and their interaction with the Impeller." *Journal of Turbomachinery*. Vol. 134.2. 2011. ASME, 2014. Web. 12 December 2013 <http://turbomachinery.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleID=1468712>.

Поступила (received) 14.02.2014