



УДК 621.165.001.2

К.Л. Лапшин

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН С ПРИМЕНЕНИЕМ «ИНТЕГРАЛЬНЫХ» СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК

Создание конкурентоспособной паровой турбины невозможно без систематического использования современных методов оптимального проектирования, в основе которых лежит детальный проектировочный газодинамический расчет течения водяного пара с учетом пространственной структуры потока. Эти методы должны корректно учитывать такие прогрессивные конструкторские решения, направленные на повышение экономичности турбины, как тангенциальный наклон, саблевидность и обратная закрутка сопловых лопаток, в том числе и их комбинации, что особенно уместно применять для длинных последних ступеней цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин.

Проточные части современных паровых турбин достигли высокой степени аэродинамического совершенства. Вместе с тем огромные мощности и длительные сроки эксплуатации делают экономически оправданным поиск даже десятых долей процента КПД турбин. Обнаружить скрытые резервы повышения экономичности паровых турбин можно, используя на этапе проектирования проточных частей математические методы целенаправленного поиска оптимального варианта — методы нелинейной оптимизации, реализуемые на ЭВМ. Общий подход к постановке и решению задач компьютерной оптимизации проточных частей паровых и газовых турбин изложен в монографии [1].

Для практического решения весьма сложной научно-технической проблемы компьютерной оптимизации ЦНД паровых турбин разработан авторский программный комплекс *CND.ОРТ* в среде *ТУРБО-ПАСКАЛЬ* для персональных компьютеров (ПК) [1]. Этот комплекс имеет широкие возможности и может быть использован как в режиме компьютерной оптимизации, так и в режиме диалога с ПК.

Основу математической модели этого комплекса составляет проектировочный газодинамический расчет (обратная задача) проточной части ЦНД паровой турбины при заданных диа-

метрах и высотах лопаточных венцов в цилиндрической системе координат в двухмерной постановке задачи. Расчетные сечения $z = \text{const}$ располагаются в межвенцовых зазорах проточной части.

В сечениях $z = \text{const}$ вдоль радиуса ищется совместное решение уравнения

$$c = c_c \exp \left\{ \int_{r_c}^r \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \alpha + \text{tg}^2 \alpha \text{tg}^2 \gamma} \times \right. \\ \left. \times \left[\text{tg} \alpha \left(\frac{\text{tg} \delta}{B(r)} - \frac{\text{tg} \alpha \text{tg} \gamma}{r} \left(\text{tg} \gamma + \frac{(\text{tg} \gamma'' - \text{tg} \gamma') r}{r'' - r'} \right) \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{A(\Delta \alpha)}{r} \right] dr \right\} \quad (1)$$

и уравнения неразрывности [1]. Уравнение (1) представляет собой результат совместного решения уравнений движения в форме Эйлера и уравнения энергии [1]. В уравнении (1): c — абсолютная скорость пара; α — угол между проекцией вектора скорости c на плоскость $z - u$ и положительным направлением оси u ; γ — угол между проекцией вектора скорости c на плоскость $r - z$ и положительным направлением оси z ; δ — угол тангенциального наклона линии центров масс сечений сопловых лопаток (ТНСЛ) относительно радиуса в плоскости $r - u$; $B(r)$ — расстояние вдоль оси z между входными кромками сопловых и рабочих лопаток; $A(\Delta \alpha)$ — коэффициент, учитывающий характер изменения угла α_1 по высоте сопловых лопаток; r — текущий радиус; индексы «'», «''», «c» указывают на принадлежность параметра соответственно к корневому, периферийному или среднему радиусу.

В сечениях за рабочими лопатками в уравнении (1) по соображениям прочности обычно принимается $\delta = 0$ и методом итераций находится такое распределение углов α_2 потока, чтобы удовлетворить условию постоянства удельной мощности вдоль радиуса ступени.

Проектировочные расчеты выполняются для дозвуковых и сверхзвуковых скоростей потока пара с учетом их радиальных составляющих. Свойства водяного пара учитываются путем аппроксимации диаграммы состояния по методике ВТИ [2]. Для учета потерь кинетической энергии созданы полуэмпирические зависимости [1], полученные в основном по результатам экспериментальных исследований на модельных и натурных турбинах, а не плоских решетках профилей. Такой подход позволяет учесть эффекты, связанные с управлением градиентом степени реактивности и уровнем вторичных потерь за счет применения тангенциального наклона, обратной закрутки и саблевидности направляющих лопаток, в том числе и их комбинаций, и вскрыть тем самым дополнительные резервы повышения экономичности турбин.

Применение метода штрафных функций дает возможность свести задачу оптимизации к следующей [1]: максимизировать $\eta_{ТП}(X)$, $X \subseteq E^n$, где $\eta_{ТП}$ — «присоединенная» целевая функция, основу которой составляет внутренний КПД проточной части всей паровой турбины (или отсека), X — совокупность n независимых переменных x_i в n -мерном евклидовом пространстве переменных.

Для решения задач компьютерной оптимизации разработана процедура «Поиск» [1], которая реализует основную идею релаксационного метода (метод покоординатного спуска, метод Гаусса — Зейделя) — отдельную оптимизацию по каждой из переменных при фиксированных значениях остальных переменных. В отличие от

классического подхода, при оптимизации по каждой из переменных используется не градиентный метод, а прямое упорядочение вариантов по критерию эффективности (метод прямого поиска).

Суть работы процедуры «Поиск» поясняет рис. 1. После ввода исходных данных одной из варьируемых величин x_i присваивается ряд значений через одинаковый шаг. За счет выбора диапазона изменения независимой переменной x_i можно переходить от задач дальнего поиска к задачам ближнего поиска. Для каждого из значений x_i выполняется процедура «Отсек», т. е. проектировочный газодинамический расчет проточной части осевой тепловой турбины, и определяется функция цели $\eta_{ТП}$. Затем находится значение переменной $x_{i\text{opt}}$, доставляющее максимум функции $\eta_{ТП}$. После этого по аналогичной схеме ищется оптимальное значение следующей независимой переменной, но уже с зафиксированным значением переменной $x_{i\text{opt}}$. Поиск максимума функции $\eta_{ТП}$ с приемлемой точностью требует, как правило, нескольких глобальных циклов отдельной оптимизации по каждой из независимых переменных x_i .

Такой подход к компьютерной оптимизации проточной части ЦНД паровой турбины обеспечивает нахождение максимума целевой функции $\eta_{ТП}$ (основу которой составляет внутренний КПД η_T проточной части ЦНД) для заданных в одномерной сетке значений каждой из независимых переменных, в том числе и на границе области их изменения. В этом случае отпадают проблемы, связанные с возможным «зацикливанием» задачи нелинейной оптимизации. Кроме того, программа для ПК получается простой и компактной, с небольшим потребным объемом оперативной памяти. Поэтому даже для решения задач большой размерности можно использовать ПК среднего класса без обращения к внешней памяти, что позволяет получить решение с заданной точностью за приемлемое время.

При одинаковом числе шагов m_s для каждой из независимых переменных во всех циклах отдельной оптимизации целесообразно в первом глобальном цикле поиска назначать наибольший диапазон изменения каждой из независимых переменных x_i , сужая его в следующих циклах (рис. 2). Этот диапазон A_{si} на цикле I образуется отрезками $A_{si}/2$ справа и слева от заданного зна-

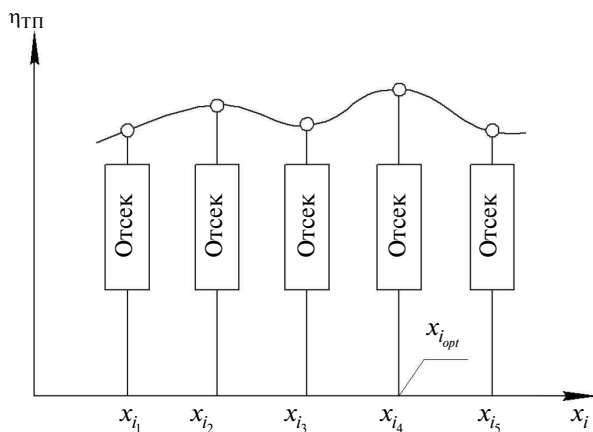


Рис. 1. Элемент процедуры «Поиск»

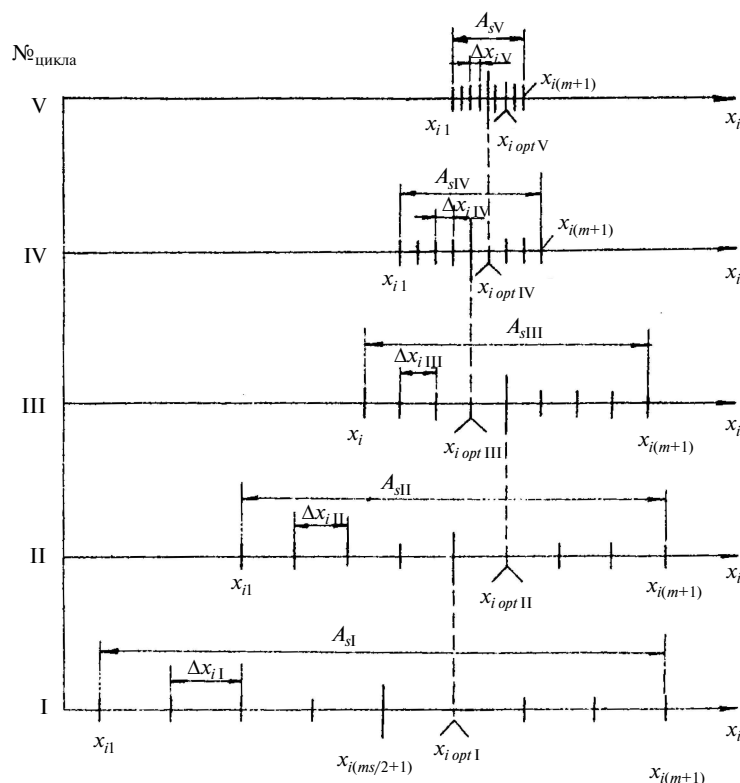


Рис. 2. Изменение диапазона варьирования переменной x_i

чения $x_{i(ms/2+1)}$ переменной на оси координат, а в последующих циклах — от найденных в предыдущих циклах оптимальных значений $x_{i opt}$ этой переменной, благодаря чему и происходит «улучшение» переменной x_i . Таким образом, поиск по каждой из переменных ведется на отрезке соответствующей оси координат, который при переходе от цикла к циклу уменьшается в размерах и перемещается по этой оси. Благодаря такому подходу реализуется также идея переменного шага Δx_i , размер которого уменьшается с приближением к максимуму функции цели.

Изложенный алгоритм оптимизации проточной части осевой тепловой турбины предназначен для решения задач большой размерности. Известно, что для решения таких задач методы ускоренной сходимости могут не дать желаемого результата с точки зрения сокращения общего машинного времени решения задачи на ПК. Этот парадокс объясняется тем, что, несмотря на уменьшение количества шагов поиска, в методах ускоренной сходимости на каждом большом шаге неизбежны итерации вычислительного процесса становятся более сложными

и трудоемкими, так что общее количество компьютерных операций может оказаться соизмеримым с рассмотренным выше методом.

Поскольку в процедуре «Поиск» метод прямого упорядочения вариантов по критерию эффективности используется не в чистом виде, а в сочетании с релаксационным методом, то нахождение глобального максимума функции цели, строго говоря, не гарантируется, как, впрочем, и для большинства других методов решения задач оптимизации большой размерности. Однако практика оптимизации на ПК проточных частей турбин показала, что при переходе от цикла к циклу приращение функции цели $\eta_{ТП}$ всегда положительно. Общий прирост целевой функции $\eta_{ТП}$ после завершения компьютерной оптимизации позволяет предположить, что в процессе поиска найдено значение $\eta_{ТП}$, близкое к глобальному максимуму.

Развитый выше подход к решению проблемы компьютерной оптимизации проточной части турбины дает возможность реализовать конкретные практические задачи ее оптимального проектирования.

В качестве примера практической реализации рассмотренных выше положений теории рассмотрим четыре варианта компьютерной оптимизации пятиступенчатого ЦНД мощной паровой турбины для ТЭС, полученные за счет применения программного комплекса *CND. OPT.* Меридианные обводы проточной части для всех вариантов ЦНД приняты одинаковыми, относительное удлинение рабочих лопаток последней ступени — $d_{2c}/l_2 = 2,58$. Все четыре варианта получены оптимизацией из одной и той же стартовой точки.

Проектировочные газодинамические расчеты ЦНД выполнялись на 11 радиусах. Число ступеней и количество лопаток в каждом венце приняты для всех вариантов одинаковыми. Расход пара, давление, температура и влажность торможения пара перед соплами первой ступени, расходы пара в отборы и давление в потоке

пара на среднем диаметре за последней ступенью (0,003 МПа) во всех вариантах расчетов поддерживались также одинаковыми. Основные результаты расчетов представлены в таблице.

Все четыре варианта ЦНД, представленные в таблице, получены в результате компьютерной оптимизации пятиступенчатого ЦНД. В качестве целевой функции привлекался КПД η_T проточной части ЦНД.

Варьируемыми независимыми переменными служили давления p_1 и p_2 в потоке перед и за лопаточными венцами, кроме давления p_{2n} за последней ступенью, которое во всех вариантах расчета поддерживалось постоянным.

Кроме того, при выборе вариантов 2, 3, 4 варьировался показатель степени n_α в уравнении $\alpha_1 = \arctg(\operatorname{tg}\alpha_{1c} (r_1/r_2)^{n_\alpha})$ и δ'' ТНСЛ в корневых сечениях НА.

Результаты компьютерной оптимизации пятиступенчатого ЦНД мощной паровой турбины

Название параметра	Значение параметра в четырех вариантах ЦНД			
	1	2	3	4
Внутренний диаграммный КПД η_T ЦНД	0,839	0,842	0,846	0,848
Мощность ЦНД, N_T , кВт	29286	29432	29630	29686
Внутренний КПД η последней ступени	0,700	0,704	0,708	0,710
Перепад энтальпий H_0 на последнюю ступень, кДж/кг	245,7	242,8	235,8	232,3
Число Маха $M_{c_1'}$ у корня за НЛ последней ступени	1,875	1,798	1,735	1,700
Число Маха $M_{w_2'}$ у периферии за РЛ последней ступени	1,615	1,607	1,534	1,521
Перепад степени реактивности $\Delta\rho = \rho'' - \rho'$ для последней ступени	0,700	0,636	0,555	0,530
Скорость c_1'' у периферии за НЛ последней ступени, м/с	356	358	384	385
Показатель степени n_α ступеней ЦНД	1	0,92	0,85	0,85
	1	0,92	0,85	0,84
	1	0,89	0,83	0,85
	1	0,89	0,88	0,86
	0	0,09	0,09	0,09
Углы δ ТНСЛ на корневом, среднем и периферийном радиусах последней ступени, град	0,0	8,7	7,4	3,6
	0,0	0,0	4,6	8,9
	0,0	0,0	0,0	0,0
Приращение КПД $\Delta\eta_T$ отсека по сравнению с вариантом 1, %	0,0	0,3	0,7	0,9
Приращение мощности ΔN_T , кВт, отсека по сравнению с вариантом 1	0,0	146	344	400

Таким образом, поиск оптимального варианта выполнялся в девятимерном (вариант 1) и в девятнадцатимерном (варианты 2, 3, 4) пространстве варьирования независимых переменных.

Персональный компьютер (ПК) с тактовой частотой 2,3 ГГц анализировал большой ряд ЦНД и выбирал из них оптимальный с максимальными значениями внутреннего КПД η_T и мощности N_T : вариант 1 выбран в результате анализа 168 ЦНД за 48 секунд, вариант 2 — при анализе 521 ЦНД за 114 секунд, вариант 3 — из 521 ЦНД за 139 секунд, вариант 4 принят путем анализа 867 ЦНД за 210 секунд.

Дадим комментарии этим четырем оптимальным вариантам ЦНД.

Вариант 1. Лопаточные венцы первых четырех ступеней закручены по закону потенциального вихря, а последней ступени — по закону постоянства угла α_1 вдоль радиуса. Поэтому при выборе варианта 1 ЦНД (в отличие от вариантов 2, 3, 4) показатель степени n_α в уравнении $\alpha_1 = \arctg(\operatorname{tg}\alpha_{1c}(r_1/r_2)^{n_\alpha})$ равен единице для первых четырех ступеней и нулю для последней (см. табл.). Линии центров масс сопловых лопаток всех ступеней ориентированы вдоль радиуса (рис. 3), поэтому углы наклона δ на корневом, среднем и периферийном радиусах последней ступени равен нулю — $\delta' = \delta_c = \delta'' = 0$ (см. табл.).

Очевидно, что оптимальный вариант 1 ЦНД располагает определенными резервами повышения экономичности. Так, например, перепад энтальпий H_0 на последнюю ступень чрезмерно велик, поэтому числа Маха M_{c_1} в корневых сечениях за НЛ и M_{w_2} в периферийных сечениях за РЛ последней ступени имеют неблагоприятные, высокие значения (см. табл.). По этим причинам внутренний КПД η последней ступени невелик. Перепад степени реактивности $\Delta\rho = \rho'' - \rho'$ последней ступени максимален среди рассмотренных вариантов (см. табл.). Степень реактивности у периферии последней ступени велика, поэтому скорость пара c_1'' у периферии за НЛ мала. Это приводит к слабому разгону капельной влаги в межвенцовом зазоре и к повышенной эрозии периферийных сечений рабочих лопаток последней ступени.

Чрезмерно высокие числа Маха M_{w_2} у периферии за рабочими лопатками последней ступени ухудшают работу выходного диффузора. Поэтому для последней ступени целесообразно применить мероприятия по снижению градиента степени реактивности.

Вариант 2. В последнее время в конструкциях паровых турбин с целью снижения градиента степени реактивности и уменьшения вторичных потерь в корневых сечениях направляющих аппаратов (НА) применяются «саблевидные» сопловые лопатки для всех ступеней ЦНД (рис. 3).

Отрицательные углы δ'' у периферии НЛ, как в классических «саблевидных» лопатках, в ступенях ЦНД обычно не применяются, чтобы не увеличивать градиент степени реактивности и не уменьшать тем самым разгон капельной влаги у периферии за НЛ. По этому принципу спроектирован ЦНД варианта 2.

По сравнению с вариантом 1 в варианте 2 увеличилось: внутренний КПД η_T , мощность N_T , КПД η последней ступени и скорость c_1'' у периферии за НЛ; при этом уменьшились перепад энтальпий H_0 , число Маха M_{c_1} у корня за НЛ, число Маха M_{w_2} у периферии за РЛ и пере-

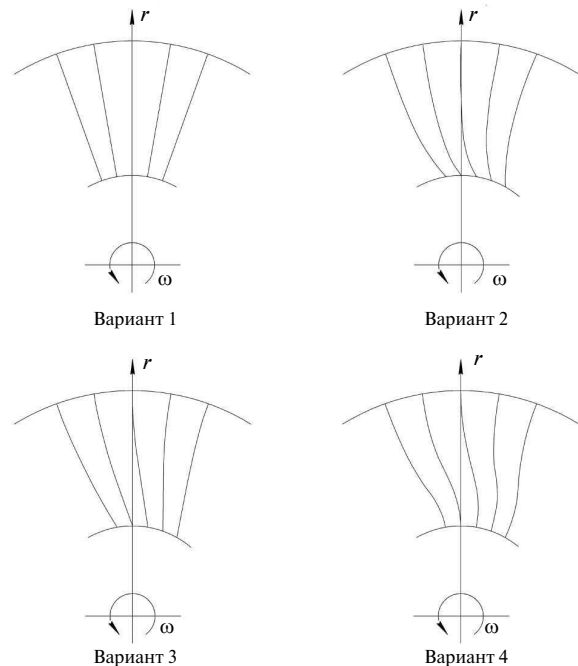


Рис. 3. Линии центров масс сопловых лопаток со стороны выходных кромок; (ω — направление вращения ротора)

пад степени реактивности $\Delta\rho = \rho'' - \rho'$ для последней ступени (см. табл.). Все перечисленные основные результаты компьютерной оптимизации варианта 2 по сравнению с вариантом 1 имеют положительный эффект.

Вариант 3. Ранее в совместных расчетно-теоретических и экспериментальных исследованиях Ленинградского политехнического института и Ленинградского металлического завода был предложен рациональный способ пространственного проектирования сопловых лопаток ЦНД паровых турбин [3]. Суть этого предложения состоит в следующем. Известен сопловой аппарат, лопатки которого от внутреннего до наружного обводов проточной части наклонены в сторону вращения РЛ таким образом, что центры масс НЛ лежат на прямой линии. Однако наклон лопаток ограничен по причине увеличения вторичных потерь у периферии НЛ. Поэтому с целью повышения экономичности турбины и уменьшения эрозионного износа РЛ за счет снижения градиента степени реактивности было предложено линии центров масс периферийных сечений НЛ вывести на радиальное направление [3] (см. рис. 3). Именно по такому принципу были спроектированы сопловые лопатки всех ступеней варианта 3.

Все положительные свойства варианта 2 по сравнению с вариантом 1 усилились в варианте 3 (см. табл.).

Вариант 4. Для сопловых лопаток всех ступеней применено специальное проектирование, суть которого состоит в следующем. В корневых сечениях сопловых лопаток ступеней ЦНД поток пара — околосвуковой или сверхзвуковой, а вторичные потери, как известно, малы [4]. Поэтому оптимальный угол ТНСЛ у корня последней ступени равен всего 3,6 градуса. Далее угол ТНСЛ увеличивается до 8,9 градуса на среднем

диаметре с целью снижения градиента степени реактивности. Затем угол ТНСЛ в направлении радиуса уменьшается до нулевого значения у периферии. Линия центров масс сечений сопловой лопатки по конфигурации напоминает знак интеграла (рис. 3). Поэтому назовем этот новый способ пространственного проектирования сопловых лопаток «интегральным».

Все положительные свойства вариантов 2 и 3 по сравнению с вариантом 1 усилились в варианте 4 (см. табл.).

Таким образом, анализ основных результатов вычислительного эксперимента, представленных в таблице, позволяет сделать вывод о том, что «интегральные» сопловые лопатки в сочетании с компьютерной оптимизацией являются существенным резервом повышения экономичности проточных частей ЦНД мощных паровых турбин.

На следующем этапе проектирования ЦНД требуется перейти к профилированию лопаточных венцов для одного из рассмотренных выше оптимальных вариантов. Для создания лопаточных венцов, которые обеспечат расчетные поля параметров, скоростей и углов потока пара в контрольных сечениях $z = \text{const}$ проточной части, необходимо располагать информацией о соотношении между эффективными $\alpha_{1\text{эф}}$ и поточными углами α_1 и о коэффициентах расхода лопаточных венцов. Для варианта 1 и для рабочих решеток всех вариантов ($\delta = 0$) такая информация опубликована, например в монографии [4]. Однако для сопловых решеток вариантов 2, 3 и 4 с ТНСЛ такая информация может быть получена только на основе обобщения результатов обширных экспериментальных исследований отсеков турбинных ступеней с ТНСЛ. Поэтому она, как правило, является конфиденциальной. Некоторые соображения по этому поводу изложены в статье [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапшин, К.Л. Оптимизация проточных частей паровых и газовых турбин [Текст]: монография / К.Л. Лапшин.— СПб., 2011.— 177 с.
2. Ривкин, С.А. Уравнения состояния воды и водяного пара для машинных расчетов процессов и оборудования электростанций [Текст] / С.А. Ривкин, Е.А. Кремневская // Теплоэнергетика.— 1977. № 3.— С. 69–73.
3. Авторское свидетельство № 985328. Сопловой аппарат [Текст] / И.И. Кириллов, К.Л. Лапшин, В.Н. Садовничий, С.А.-Г. Вольфовский, В.А. Матвеевко, А.П. Огурцов.— 1982.
4. Щегляев, А.В. Паровые турбины [Текст]: монография / А.В. Щегляев.— М., 1976.— 368 с.
5. Лапшин, К.Л. Трехмерный газодинамический расчет потока в ступени осевой турбины со сниженным градиентом степени реактивности [Текст] / К.Л. Лапшин, М.С. Панкратов // Энергомашиностроение.— 2006. № 2.— С. 57–60.