

УДК 621.165

А.В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф., Ю.Н. ГОВОРУЩЕНКО, канд. техн. наук,
А.П. УСАТЫЙ, канд. техн. наук, А.С. РУДЕНКО

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

МНОГОУРОВНЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОСЕВЫХ ТУРБИН С УЧЁТОМ ПЕРЕМЕННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Розроблена підсистема оптимізації проточної частини осьових турбін, які працюють за змінним графіком навантаження. Для вирішення задачі запропоновано використовувати рекурсивний алгоритм багаторівневої оптимізації проточної частини, та методи теорії планування експерименту. Підсистема реалізована у вигляді проектної процедури для впровадження у САПР «Турбоагрегат» як предметна компонента єдиного інформаційного середовища.

Axial flow turbines flow path optimization subsystem working changing schedule loading have been designed. To solve the task it is proposed to make use of recursive algorithm of flow path multilevel optimization and experiment planning theory method. The subsystem is realized in the form of project procedure and is implemented at "Turboagregat" CAD system as a component of common information environment.

Разработанные к настоящему времени алгоритмы оптимального проектирования проточных частей осевых турбин [1, 2] в большинстве случаев применимы к машинам, работающим на постоянном (как правило, номинальном) режиме.

Существует целый класс турбин, работающих в условиях периодического колебания нагрузки, зависящего от сезонных или иных временных графиков изменения и перераспределения тепловой и электрической мощности. При проектировании таких турбин, естественно, необходимо учитывать предполагаемые временные изменения режимных параметров, и их влияние на эффективность разрабатываемой конструкции. Это существенным образом усложняет постановку задачи, в частности, процессы параметризации, формирования целевой функции и др. Результаты решения задачи такого уровня могут существенным образом влиять на общие технико-экономические показатели проектируемой турбины и всего турбоагрегата в целом (технологии производства, вопросы маркетинга и другие аспекты, связанные с жизненным циклом изделия). Для облегчения принятия обоснованного решения представляется целесообразным реализацию решения задачи осуществлять в едином информационном пространстве (ЕИП) САПР «Турбоагрегат» [3]. Тогда получаемые результаты, являясь частью ЕИП, становятся доступными для мультидисциплинарного анализа, что значительно облегчает принятие и повышает обоснованность заключения по каждому варианту проекта.

Учитывая, что в ЕИП объекты проектирования объединены в соответствующую иерархическую структуру, при выборе методологии оптимального проектирования выбор был сделан в пользу блочно-иерархического представления процесса проектирования [2, 4], где в алгоритмах поисковой оптимизации осуществляется замена математических моделей, основанных на описании реальных физических явлений и процессов в проточной части турбины и называемых исходными математическими моделями (ИММ), на их аппроксимационные зависимости – формальные макромоделли (ФММ), например, в виде полного квадратичного полинома:

$$y(q) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i q_i + \sum_{i=1}^n A_{ii} q_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1+i}^n A_{ij} q_i q_j, \quad (1)$$

где:

A – матрица коэффициентов ФММ;

\vec{q} – вектор нормированных значений компонент вектора \vec{Q} ФММ;

n – число факторов ФММ;

\vec{Q} – вектор варьируемых параметров ФММ.

Уникальность индексов элементов ЕИП и единство пространства индексов всех элементов системы, к которым относятся и сами ИММ (предметные компоненты) и их вектора входных и выходных параметров позволяет разработать универсальный механизм формирования постановок задач оптимального проектирования, включая выбор ИММ, формирование вектора параметров ФММ, векторов целевых функций и функциональных ограничений и т.д. Так, используя, разработанный монитор формирования постановок задач оптимального проектирования (см. рис. 1), выбрав из списка предметных компонент ЕИП необходимую нам ИММ, например, проектную процедуру прямого одномерного теплового расчета проточной части осевой турбины [1, 2], мы автоматически, через ее атрибуты получаем вектора индексов ее входных (исходные данные) и выходных (результаты расчета) параметров, из которых формируем выше отмеченные вектора параметров ФММ для каждого уровня проектирования.

В данном случае они могут выглядеть следующим образом:

• **уровень “Цилиндр”**

○ Варьируемые параметры ФММ:

- определяющие форму обводов проточной части ($d_{k2}, d_{cp2}/l_2$);
- влияющие на распределение теплоперепадов между ступенями (α_{1k}, β_{2k});
- режимные параметры – давление и энтальпия торможения на входе в цилиндр, расходы пара в регенеративные и теплофикационные отборы ($P_0^*, i_0^*, G_{otb_i} \dots$);

○ Целевые функции:

- мощность, КПД цилиндра ($N_{ц}, \eta_{ц} \dots$)

○ Функциональные ограничения:

- расход пара и др. ($G_{ц}, \dots$)

• **уровень “Ступень”**

○ Варьируемые параметры ФММ:

- поступающие с уровня “Цилиндр” ($P_0^*, i_0^*, d_{k2}, d_{cp2}/l_2, \alpha_{1k}, \beta_{2k}$);
- влияющие на эффективность решеток ступени ($b_1/l_1, b_2/l_2, t_1/b_1, t_2/b_2$).

○ Целевые функции:

- мощность, КПД ступени и др. (N_c, η_c, \dots).

○ Функциональные ограничения:

- напряжения в лопатках, диске, диафрагме и др. (σ, \dots).

Как видно из рис. 1, непосредственно компонентами вектора ФММ уровня “Цилиндр” могут выбираться только параметры отдельных ступеней, для остальных же ступеней аналогичные параметры определяются линейной или квадратичной интерполяцией внутри диапазонов, определенных значениями параметров, включенных в вектор варьируемых параметров ФММ.

Постановка задачи проектирования

Параметризация | Параметры оптимизации

Выбор проектной процедуры: Прямой одномерный расчёт

Уровень объекта проектирования: Цилиндр

Число ступеней: 5

	ФММ	Примечание	Свойства	Min знач.	Max знач.
1	Nc	Мощность цилиндра	Целевая ф-ия		
2	kpci	КПД цилиндра	Целевая ф-ия		
3	Gin	Расход пара	Ограничение	15	20
4	Nуд	Удельная мощность	Целевая ф-ия		

	Параметры	Диапазон, %	ИММ	1-я ступень	2-я ступень	3-я ступень	4-я ступень	5-я ступень
1	p0*	5	p0	по ФММ	Линейная	по ФММ	Линейная	по ФММ
2	i0*	10	i0	по ФММ	Линейная	по ФММ	Линейная	по ФММ
3	dk	10	d1	по ФММ	Линейная	по ФММ	Линейная	по ФММ
4	dsl/l	10	l	по ФММ	Линейная	по ФММ	Линейная	по ФММ
5	a1k_g	10	outEffAng	по ФММ	Парабола	по ФММ	Парабола	по ФММ
6	b2k_g	10	outEffAng	по ФММ	Парабола	по ФММ	Парабола	по ФММ

Ввод

OK

Рис. 1. Диалог постановки задачи оптимального проектирования ПЧ

При выборе конкретных критериев качества объектов каждого уровня проектирования, следует принимать во внимание положение теории систем [5], в соответствии с которым состояние объекта на каждом из уровней оптимизации считается целесообразным, если оно способствует достижению общего оптимального решения. Учитывая это, примем на первом уровне оптимизации критерий качества максимум мощности цилиндра, на втором уровне – максимум КПД турбинных ступеней.

Используя рекурсивный обход уровней проектирования, создаем на каждом из них с помощью методов теории планирования эксперимента [6] соответствующие ФММ целевых функций и функциональных ограничений. При этом процесс рекурсии организован таким образом, что состояние вектора входных параметров объекта проектирования вышестоящего уровня (“Цилиндр”) в каждой точке численного эксперимента этого уровня зависит не только от значений компонент его вектора ФММ, но и от результатов решения оптимизационных задач низлежащего уровня (“Ступень”), а именно, от оптимальных значений $(b_1/l_1, b_2/l_2, t_1/b_1, t_2/b_2)$, поиск которых осуществляется с учетом параметрических ограничений, поступающих с вышестоящего уровня в виде значений $(d_{k2}, d_{cp2}/l_2, \alpha_{1k}, \beta_{2k})$, определяемых матрицей планирования эксперимента. Таким образом, создаваемая на каждом вышестоящем уровне ФММ целевой функции включает в себя лучшие решения всех низлежащих уровней.

При планировании численных экспериментов диапазоны изменения режимных параметров выбираются в соответствии с предполагаемым графиком их изменения и остаются постоянными в процессе итераций по уточнению оптимальных решений. Диапазоны изменения конструктивных компонент вектора ФММ определенным образом сужаются в процессе уточняющих итераций. В результате обработки спланированного эксперимента создаются ФММ критериев качества и

функциональных ограничений вида (1), как функции геометрических и режимных параметров.

Учёт влияния графиков изменения режимных параметров на критерии качества ПЧ достигается интегрированием ФММ, т.е. новые коэффициенты ФММ интегрального критерия качества получаются из следующей зависимости:

$$y(q) = A_0 + \sum_{i=1}^r A_i q_i + \sum_{j=1}^p A_j \int_0^1 q_i(t) dt + \sum_{i=1}^{r-1} \sum_{k=i+1}^r A_{ik} q_i q_k + \sum_{j=1}^{p-1} \sum_{m=j+1}^p A_{jm} \int_0^1 q_i(t) q_m(t) dt + \\ + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^p A_{ij} q_i \int_0^1 q_i(t) dt + \sum_{i=1}^r A_{ij} q_i^2 + \sum_{j=1}^p A_{jj} \int_0^1 q_j^2(t) dt. \quad (2)$$

В ФММ вида (2) входят интегралы от режимных параметров, которые можно вычислить, зная графики изменения режимных параметров, и преобразовать ее к виду:

$$y_m(q) = A_{0p} + \sum_{i=1}^r (A_{ip} q_i + A_{ii} q_i^2) + \sum_{i=1}^{r-1} \sum_{k=i+1}^r A_{ik} q_i q_k, \quad (3)$$

где

$$A_{0p} = A_0 + \sum_{j=1}^p \left(A_i \int_0^1 q_i(t) dt + A_{jj} \int_0^1 q_j^2(t) dt \right) + \sum_{j=1}^{p-1} \sum_{m=j+1}^p A_{jm} \int_0^1 q_j(t) q_m(t) dt, \\ A_{ip} = A_i + \sum_{j=1}^p A_{ij} \int_0^1 q_i(t) dt.$$

ФММ вида (3) зависит только от геометрических параметров (режимные параметры интегрально входят в новые коэффициенты ФММ) и может быть использована для оценки критерия качества в алгоритме оптимального проектирования ПЧ осевой турбины, работающей на переменном режиме.

Для поисковой оптимизации используются точки ЛП_τ – последовательности, в которых на 1-м шаге по ФММ определяется значение целевой функции, и если это значение оказывается лучше любой из компонент пяти альтернативных решений, то оно проверяется на допустимость расчетом ФММ функциональных ограничений. Если функциональные ограничения удовлетворяют условиям, то худшая компонента вектора альтернативных решений заменяется на вновь найденное.

После завершения ЛП_τ – поиска лучшие пять точек рассчитываются по ИММ, а полученные результаты предоставляются пользователю для дальнейшего мультидисциплинарного анализа в рамках ЕИП САПР «Турбоагрегат». При необходимости параметры одной из этих точек могут быть уточнены новой итерацией, в процессе которой созданные в более узком диапазоне новые ФММ критерия качества и функциональных ограничений используются в алгоритме оптимизации.

Таким образом, предложенный рекурсивный алгоритм многоуровневой оптимизации проточной части осевых турбин, работающих на переменном режиме, позволяет представить задачу оптимального проектирования, как единый комплекс системно-иерархически увязанных подсистем оптимизации, обеспечивающих на каждом уровне иерархии решение своих задач в различных постановках и необходимыми наборами критериев качества и ограничений, обеспечивая при этом

эффективное достижение общей цели – получение оптимального решения для всей проточной части в целом.

Преимущество описанного выше подхода к решению данной задачи состоит в возможности рассмотрения огромного числа различных комбинаций конструктивных параметров осевой турбины и обеспечить выбор наилучшего, оптимального варианта, под заданные графики изменения режимных параметров.

Очевидно также, что внедрение этой проектной процедуры в ЕИП САПР «Турбоагрегат» в качестве предметной компоненты, существенным образом расширяет ее возможности в плане обмена результатами оптимального проектирования с другими предметными компонентами ЕИП и программными продуктами вне ЕИП, что позволяет провести более детальный и всесторонний анализ полученной конструкции проточной части и сделать выбор более обоснованным и достоверным.

В заключение следует отметить, что описанный выше поход, основанный на использовании рекурсивного алгоритма многоуровневой оптимизации с использованием методов теории планирования эксперимента, является достаточно универсальным и не зависит от уровневых постановок задач оптимизации. Наличие монитора формирования постановок задач оптимального проектирования превращает его в мощный инструмент, предоставляющий пользователю широкие возможности в выборе постановок задач оптимального проектирования проточных частей осевых турбин, работающих в условиях переменных нагрузок.

Литература

1. *Бойко А. В., Говорущенко Ю. Н.* Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбин. – Харьков: Вища школа, 1989. – 217 с.
2. *Бойко А. В.* Аэродинамический расчёт и оптимальное проектирование проточной части осевых турбин / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, С. В. Ершов, А. В. Русанов, С. Д. Северин. – Монография. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.
3. *Бойко А. В.* Разработка информационной среды и средств динамического управления информационными моделями данных сложных технических объектов применительно к САПР «Турбоагрегат» / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, А. П. Усатый // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных работ. Тематический выпуск: «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – №5. – с. 36-42.
4. *Усатый А. П.* Оптимизация ЦВД мощных паровых турбин. Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1988. – 187 с.
5. *Крон Г.* Исследование сложных систем по частям / Пер. с англ. – М.: Наука, 1972. – 542 с.
6. *Vox E. P., Behnken D. W.* Some new three-level Design for the Study of Quantitative Variables // Technometrics. – 1960. – vol. 2. – № 4. – pp. 455-475.

© Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П., Руденко А.С., 2007