

УДК 621.165

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ГАЗОВЫХ ТУРБИН С УЧЁТОМ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РАМКАХ САПР «ТУРБОАГРЕГАТ»

**А.В. Бойко**Доктор технических наук, профессор\*  
E-mail: aboiko@kpi.kharkov.ua**Ю.Н. Говорущенко**Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*  
E-mail: jng@ua.softinway.com**А.П. Усатый**Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*  
E-mail: apus1952@yandex.ru**А.С. Руденко**

Аспирант\*

E-mail: 11alexey111@rambler.ru

\*Кафедра турбиностроения

Национальный технический университет «Харьковский

Политехнический Институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Контактный тел.:(057) 707-60-88

Сайт кафедры: <http://users.kpi.kharkov.ua/tars/>

*Розроблено багаторівневий алгоритм оптимізації проточних частин газотурбінних установок з урахуванням режимів експлуатації. Показані основні можливості та галузі застосовування розробленого алгоритму. Виконано оптимальне проектування проточної частини низького тиску установки GT-750-6M*

*Ключові слова: оптимізація, проточна частина, газотурбінна установка*

*Разработан многоуровневый алгоритм оптимизации проточных частей газотурбинных установок с учётом режимов эксплуатации. Показаны основные возможности и области применения разработанного алгоритма. Выполнено оптимальное проектирование проточной части низкого давления установки GT-750-6M*

*Ключевые слова: оптимизация, проточная часть, газотурбинные установки*

*The multilevel algorithm of optimization of gas-turbine installations turbines flow paths taking into consideration operation modes was developed. The basic capabilities and fields of application of the developed algorithm are shown. Optimal design of the low pressure turbine flow path of installation GT-750-6M was performed*

*Key words: optimisation, flowing part, gas-turbine installations*

В настоящее время очевидна четко выраженная тенденция увеличения доли газотурбинных установок (ГТУ) среди других типов тепловых двигателей. Указанная тенденция продолжается более 40 лет и объясняется, с одной стороны, наличием определённых качеств, которые присущи другим тепловым двигателям, а с другой – постоянным повышением их надёжности, эффективности (КПД современных зарубежных и отечественных образцов ГТУ простого цикла может достигать 40% и выше) и уменьшением вредных выбросов в атмосферу. Однако постоянный рост цен на энергоресурсы и жесткая конкуренция между производителями подобных агрегатов заставляют проектировщиков искать скрытые резервы дальнейшего повышения их экономичности.

Обзор современных алгоритмов оптимального проектирования турбоагрегатов даёт основания утверждать, что для получения лучшего результата, в процессе проектирования проточной части (ПЧ), необходимо принимать во внимание индивидуальные особенности эксплуатации агрегата и влияние изменения парамет-

тров тепловой схемы установки на режим работы ПЧ [1, 2]. Накопленный опыт проектирования турбоагрегатов показывает, что данный класс задач наиболее удобно решать в рамках систем автоматизированного проектирования (САПР) с использованием высокоэффективных оптимизационных алгоритмов.

В данной работе приведен рекурсивный многоуровневый алгоритм для оптимизации газовых турбин, учитывающий влияние предполагаемых режимов работы установки на геометрические параметры ПЧ. Указанный алгоритм разработан на базе многоуровневого алгоритма оптимизации осевых турбин [3] путём существенного расширения возможностей его использования и круга решаемых задач, а именно:

- позволяет учесть влияние изменения параметров тепловой схемы установки на режим работы газовых турбин (т.е. рассчитать значения недостающих режимных параметров, однозначно определяющих режим работы ПЧ, которые используются в качестве исходных данных при многорежимной оптимизации геометрии ПЧ);

- определять интегральные характеристики установки по режимам эксплуатации после оптимизации ПЧ, что даёт возможность быстро оценить полученный прирост эффективности и получить начальные данные для последующих оптимизационных итераций.

Разработанный алгоритм был практически реализован в рамках системы автоматизированного проектирования «Турбоагрегат» в качестве сценария вычислительных процессов (СВП) [4]. Основными преимуществами указанной САПР при решении подобных задач являются:

- наличие ЕИП и развитых информационных структур;
- наличие универсального диалога формирования СВП, включая выбор математических моделей расчета, формирование вектора оптимизируемых и режимных параметров, векторов целевых функций и функциональных ограничений (рис. 1), с последующей обработкой сформированных сценариев;
- наличие в составе САПР всех необходимых процедур для реализации разработанного алгоритма в качестве СВП (математических моделей расчёта, модулей информационной согласованности, средств теории планирования эксперимента, методов поисковой оптимизации);
- возможность быстрого внедрения недостающих модулей.

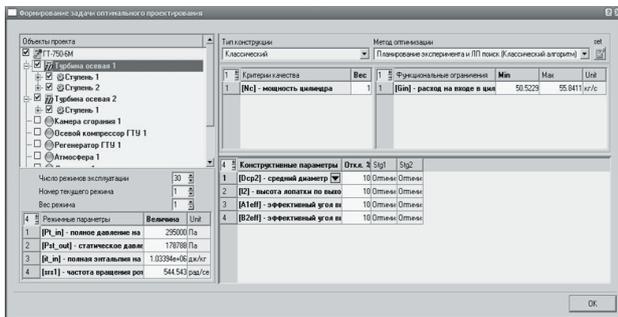


Рис. 1. Диалог формирования СВП в САПР «Турбоагрегат»

Разработанный алгоритм позволяет существенно повысить эффективность газовых турбин и эффективность работы установки в целом на заданных режимах без повышения начальных параметров цикла, а ввиду своей универсальности, может быть использован как при проектировании вновь создаваемых, так и модернизации существующих турбин ГТУ различных типов и областей применения.

### Описание оптимизационного алгоритма

Многоуровневый оптимизационный алгоритм, также как и алгоритм [3], основывается на блочно-иерархическом представлении процесса проектирования [1] таким образом, что общая оптимизационная задача разнесена на 4 локальных иерархически-подчинённых уровня. Причём на каждом уровне осуществляется решение своих «локальных» задач с необходимыми наборами математических моделей, функциональных и параметрических ограничений, критериев качества,

наборами параметров и методов оптимизации. Так, благодаря решению более простых уровневых задач и информационной согласованности между уровнями проектирования, достигается эффективное решение глобальной оптимизационной задачи. На рис. 2 показано взаимодействие и распределение задач между локальными уровнями проектирования.

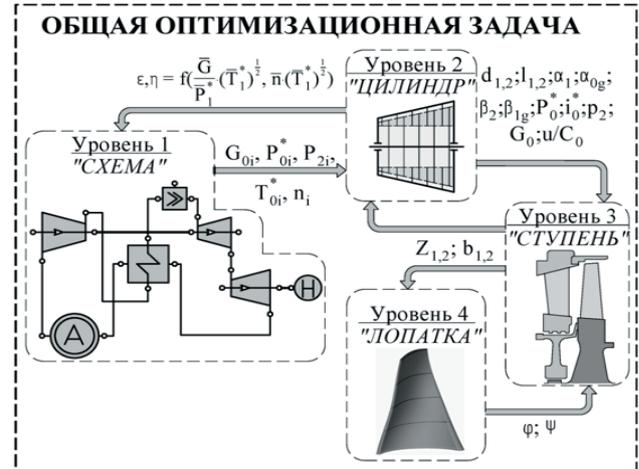


Рис. 2. Распределение задач между локальными уровнями проектирования

Наивысший уровень в иерархии процесса проектирования – «Схема» (см. рис. 2) предназначен для расчёта распределений параметров цикла ГТУ (давлений, температур, мощностей, расходов) между элементами схемы, а также для определения интегральных параметров установки (КПД установки, расход топлива и др.) на предполагаемых режимах работы.

При расчете агрегата на переменный режим для моделирования рабочих характеристик (степень сжатия/расширения, КПД, потери полного давления и т.д.) какого-либо элемента ГТУ на текущем режиме работы могут быть использованы универсальные характеристики этого объекта, упрощенные зависимости или данные, приведенные заводом-изготовителем. Причем САПР «Турбоагрегат» предоставляет проектировщику средства для комфортного управления расчётами, хранения и использования требуемых характеристик или для использования других данных позволяющих смоделировать рабочий процесс элементов схемы. Так, например, при проведении расчётов схемы установки ГТ-750-6М на различные режимы, для моделирования работы турбин и компрессора (для определения степеней сжатия/расширения –  $\epsilon$  и коэффициентов полезного действия по параметрам торможения –  $\eta$ ) были использованы универсальные характеристики в координатах  $\frac{G}{G_0} \frac{P_{10}^*}{P_1^*} \sqrt{\frac{T_1^*}{T_0^*}}$ ,  $\frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{T_{10}^*}{T_1^*}}$ , (где  $G$  – массовый расход газа,  $P^*$  и  $T^*$  – полные температуры и давления на входе,  $n$  – обороты ротора турбины, индексом «0» обозначены параметры соответствующие номинальному режиму работы установки) [5], а для остальных элементов схемы изменение характеристик с изменением режима работы не учитывались. Причём характеристика компрессора была построена по данным завода-изготовителя, а характеристика турбины была

получена расчётным путём с использованием возможностей САПР «Турбоагрегат».

Как видно из рис. 2 с высшего уровня «Схема» на уровень «Цилиндр» поступают наборы режимных параметров, однозначно определяющие предполагаемые режимы работы ПЧ. Далее на уровне «Цилиндр» осуществляется поиск наилучшей комбинации средних диаметров ( $d_1, d_2$ ), высот лопаток ( $l_1, l_2$ ), углов входа/выхода потока в абсолютном и относительном движениях ( $\alpha_1, \alpha_{0r}, \beta_2, \beta_{1r}$ ) для сопловых и рабочих решеток с учётом указанных режимов. В качестве математической модели на уровнях «Цилиндр» и «Ступень» используется процедура прямого одномерного расчёта ПЧ турбины. Для повышения эффективности использования вычислительных ресурсов, с помощью теории планирования эксперимента, осуществляется замена математической модели на её аппроксимационную зависимость в виде полного квадратичного полинома:

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

где:

$\bar{q}$  – вектор варьируемых параметров формальной макромодели (ФММ) в нормированном виде;  $Y$  – функция отклика;  $A$  – матрица коэффициентов ФММ;  $n$  – число факторов ФММ. Для построения указанной зависимости используются насыщенные планы Рехтшафнера [6]. Поиск оптимального решения осуществляется по зависимости вида (1) с использованием точек квазислучайной ЛПТ – последовательности [7] (алгоритм поиска оптимальных решений более подробно описан в [3]). На следующем уровне «Ступень» осуществляется поиск оптимальных значений хорд и чисел лопаток для сопловой и рабочей решеток ( $b_{1,2}, Z_{1,2}$ ), причём оптимизируемые параметры уровня «Цилиндр» используются в качестве параметрических ограничений. Для поиска оптимального решения используются такие же методы как на вышестоящем уровне.

Низший уровень в иерархии процесса проектирования (уровень «Лопатка») предназначен для создания профилей оптимальной аэродинамической формы и пространственного проектирования пера лопатки с учётом поступающих с верхних уровней параметрических ограничений. Оптимизация на уровне «Лопатка» позволяет улучшить течение в сопловых и рабочих каналах, тем самым повышая значения коэффициентов скорости ( $\phi, \psi$ ), которые, в свою очередь, передаются вверх по иерархии.

Следует отметить, что между 3-мя оптимизируемыми уровнями организован рекурсивный информационный обмен, вследствие чего все решения верхних уровней включают в себя лучшие решения нижних.

Когда найдено оптимальное решение на уровне «Цилиндр», используя модель прямого расчёта ПЧ, осуществляется построение универсальных характеристик спроектированных турбин, которые возвращаются на уровень «Схема» для расчёта интегральных характеристик ГТУ.

**Оптимизация турбины низкого давления (ТНД) установки ГТ-750-6М**

Для проверки работоспособности и эффективности разработанного алгоритма была выполнена оптимизация

ПЧ турбины низкого давления установки ГТ-750-6М с учётом реального графика эксплуатационных нагрузок (реальные эксплуатационные нагрузки установки колеблются в диапазоне от 60% до 72% номинальной, равной 6 МВт). Данная ГТУ используется в качестве привода газоперекачивающего агрегата, установленного на Шебелинской магистральной компрессорной станции (агрегат №7 по станции, №1 по цеху).

Актуальность выбора данного стационарного агрегата в качестве объекта исследования заключается в том, что подобные установки, наряду с установками ГТН-6, ГТ-6-750, ГПА-Ц-6,3, ГТК-10, ГПУ-10, ГТК-25 (всего около 630 шт.), широко распространены в газотранспортной системе Украины и более чем на 80% исчерпали свой ресурс [8]. Согласно концепции государственной научно-технической программы «Создание промышленных газотурбинных двигателей нового поколения для газовой промышленности и энергетики» [8] в период с 2008 по 2015 годов планируется полная замена 204 агрегатов, что составляет 32,5% от общего количества. Для сохранения работоспособности газотранспортной системы остальные агрегаты должны быть подвергнуты ремонту и модернизации.

На рис. 3а приведена расчётная характеристика турбины низкого давления, окружностью, изображенной на данном рисунке, охвачен диапазон рабочих режимов ПЧ, полученный в результате расчёта схемы установки ГТ-750-6М на реальные режимы работы за 3 месяца эксплуатации. Как видно из рисунка, турбина низкого давления работает в диапазоне режимов достаточно отдалённых от режимов наибольшей эффективности.

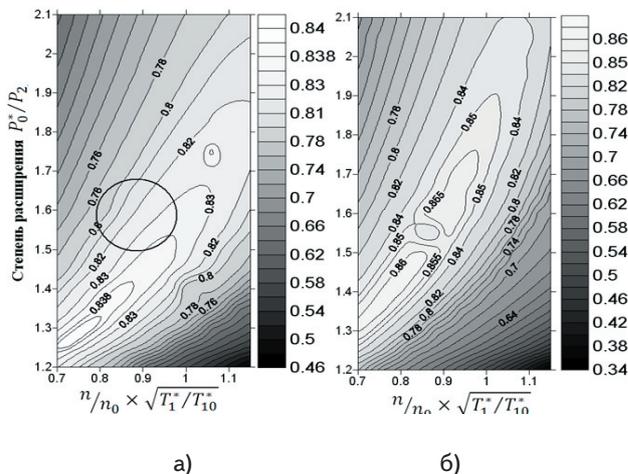


Рис. 3. Зависимость внутреннего КПД проточной части от степени сжатия и относительных параметров: а) исходный вариант; б) оптимальный вариант

В процессе оптимизации ТНД были задействованы 2 верхних уровня (уровни «Схема» и «Цилиндр») разработанного оптимизационного алгоритма. Уровень «Схема» использовался для определения режимов работы ПЧ ТНД, которые выступали в качестве исходных данных при оптимизации геометрических параметров на уровне «Цилиндр» (см. рис. 2). На уровне «Цилиндр» был выполнен поиск оптимальной комбинации следующих оптимизируемых параметров:

- средних диаметров сопловых и рабочих решеток ( $d_1, d_2$ );

- высот сопловых и рабочих лопаток ( $l_1, l_2$ );
- углов входа/выхода потока в абсолютном и относительном движениях ( $\alpha_1, \alpha_{0г}, \beta_2, \beta_{1г}$ ) для сопловых и рабочих решеток.

В качестве функционального ограничения выступал расход продуктов сгорания на входе в ТНД. Для оценки критерия качества в процессе оптимизации использовался внутренний КПД турбины. При проведении расчётных исследований было выполнено 2 итерации по уточнению оптимального решения (при проведении 2-й итерации диапазон варьирования оптимизируемых параметров был снижен с 20 до 5% в обе стороны от текущего значения параметра).

Некоторые результаты оптимального проектирования ПЧ ТНД установки ГТ-750-6М представлены в табл. 1 и на рис. 3а. Как видно из рис. 3а, в результате оптимизации удалось существенно повысить эффективность ТНД, так же видно, что область наибольшей эффективности сместилась в область предполагаемых режимов работы ПЧ. Значительное увеличение эффективности (прирост внутреннего КПД турбины на предполагаемых режимах работы составил 3-4%) стало возможным благодаря значительному снижению потерь с выходной скоростью (потери с выходной скоростью были снижены на 35-40%), при этом потери, связанные с движением рабочего тела в сопловых и рабочих решетках остались на уровне потерь в исходной конструкции.

Таблица 1

## Результаты оптимального проектирования

Параметр	Исходная конструкция	Оптимальная конструкция
$d_1, [м]$	0,970	1,088
$d_2, [м]$	0,972	1,091
$l_1, [м]$	0,210	0,206
$l_2, [м]$	0,211	0,225
$\alpha_1, [град]$	20,67	18,46
$\beta_2, [град]$	25,18	22,25
$\alpha_{0г}, [град]$	90,00	92,36
$\beta_{1г}, [град]$	47,33	45,37

## Выводы

1. Благодаря возможности учёта индивидуальных особенностей эксплуатации агрегатов, разработанный алгоритм позволяет существенно повысить показатели эффективности как вновь создаваемых, так и модернизируемых турбин ГТУ различных типов и областей применения.

2. Использование разработанного метода при модернизации ПЧ стационарных турбин ГТУ позволит

существенно повысить их эффективность без значительных материальных затрат, т.к. указанная модернизация практически не затрагивает такие дорогостоящие элементы схемы ГТУ, как компрессор, камера сгорания, регенератор и нагнетатель. Кроме того при изготовлении проточных частей нет необходимости в использовании новых, более дорогих, жаропрочных материалов т.к. не изменяются начальные параметры продуктов сгорания.

3. САПР «Турбоагрегат», разрабатываемая на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ», благодаря наличию развитого единого информационного пространства и возможности организовывать СВП, позволяет существенным образом упростить наиболее трудоёмкие процессы, связанные с формированием постановок локальных оптимизационных задач и объединением их в единую задачу оптимального проектирования сложного технического объекта.

## Литература

1. 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 – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.
2. Арзуманов А.М. Многорежимная оптимизация проточной части паровой турбины с учётом изменения параметров тепловой схемы / А.М. Арзуманов, К.Л. Лапшин // Теплоэнергетика. – 2003. – №12. – С. 68-71.
3. Бойко А.В. Методика и алгоритм оптимизации проточных частей осевых турбин с учётом режимов эксплуатации / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Тяжелое машиностроение. – 2009. – №9. – С. 11-15.
4. Бойко А.В. Интегрированное информационное пространство САПР «Турбоагрегат» – методологическое обеспечение и программная реализация / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Электронное моделирование. – К.: Академперіодика. – 2009. – №2. – С. 43-55.
5. Котляр И. В. Переменный режим работы газотурбинных установок. – М.: Машгиз, 1961. – 218 с.
6. Rechtschaffner R.L. Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs // Technometrics. – 1967. – № 9. – P. 569-575.
7. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников – М.: Наука, 1981. – 108 с.
8. Патон Б. Концепція (проект) державної науково-технічної програми «Створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики» / Б. Патон, А. Халатов, Д. Костенко, Б. Білека, О. Письменний, А. Боцула, В. Парафійник, В. Коняхін // Вісн. НАН України. – 2008. – №4. – С. 3-9.