

УДК 621.165

**А.В. БОЙКО**, д-р техн. наук; проф. НТУ «ХПИ», г. Харьков  
**Ю.Н. ГОВОРУЩЕНКО**, канд. техн. наук; с.н.с. НТУ «ХПИ», г. Харьков  
**А.П. УСАТЫЙ**, канд. техн. наук; с.н.с. НТУ «ХПИ», г. Харьков  
**А.С. РУДЕНКО**, аспирант НТУ «ХПИ», г. Харьков

### **АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ОСЕВЫХ ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С УЧЁТОМ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Розроблено трьохрівневий алгоритм для оптимізації проточних частин турбін газотурбінних установок з урахуванням режимів експлуатації. Розкрито основні можливості та галузі застосування розробленого алгоритму. Запропонований алгоритм був реалізований у вигляді сценарію обчислювальних процесів на базі єдиного інформаційного простору системи автоматизованого проектування «Турбоагрегат».

The three-level algorithm of optimization of gas-turbine installations axial turbines flow paths taking into consideration operation modes was developed. The basic capabilities and fields of application of the developed algorithm are shown. The proposed algorithm is realized as the scenario for computing processes on the basis of CAD «Turboaggregate» common information space.

На сегодняшний день газотурбинные установки (ГТУ) получили довольно широкое распространение по сравнению с другими тепловыми двигателями. Этот факт объясняется, с одной стороны, наличием определённых качеств, которые присущи другим тепловым двигателям, а с другой – тенденцией роста их экономичности (КПД современных зарубежных и отечественных образцов ГТУ достигает 36–40 %). Однако постоянный рост цен на энергоресурсы и жесткая конкуренция между производителями подобных агрегатов заставляют проектировщиков искать скрытые резервы дальнейшего повышения экономичности как вновь создаваемых, так и модернизируемых конструкций газовых турбин. Очевидно, что указанная задача может быть решена только с использованием мощной вычислительной техники и высокоэффективных оптимизационных алгоритмов.

Анализ обзора современных алгоритмов оптимального проектирования (применительно к турбоагрегатам) даёт основания утверждать, что для получения лучшего результата, в процессе проектирования проточной части (ПЧ), необходимо принимать во внимание индивидуальные особенности эксплуатации (режимы работы) и взаимное влияние элементов тепловой схемы установки [1, 2].

В данной работе приведен рекурсивный трёхуровневый алгоритм для оптимизации газовых турбин, позволяющий учесть влияние вероятного графика изменения эксплуатационной нагрузки на геометрические характеристики ПЧ. Указанный алгоритм разработан на базе многоуровневого алгоритма оптимизации [3] осевых турбин путём добавления 3-го уровня проектирования, позволяющего существенно увеличить его возможности и круг решаемых задач. Для практической реализации разработанного алгоритма было использовано единое информационное пространство (ЕИП) системы автоматизированного проектирования (САПР) «Турбоагрегат» [4]. Основными преимуществами указанной САПР при решении подобных задач являются:

- наличие ЕИП и развитых информационных структур;

- возможность формирования и обработки различных сценариев вычислительных процессов (СВП), включая выбор математических моделей расчета, формирование вектора оптимизируемых и режимных параметров, векторов целевых функций и функциональных ограничений и т.д. (см. рисунок 1);
- наличие в составе САПР всех необходимых процедур для реализации разработанного алгоритма в качестве СВП (математических моделей расчёта ПЧ осевых турбомашин и циклов ГТУ, модулей информационной согласованности, средств теории планирования эксперимента, методов поисковой оптимизации);
- возможность быстрого внедрения недостающих модулей.

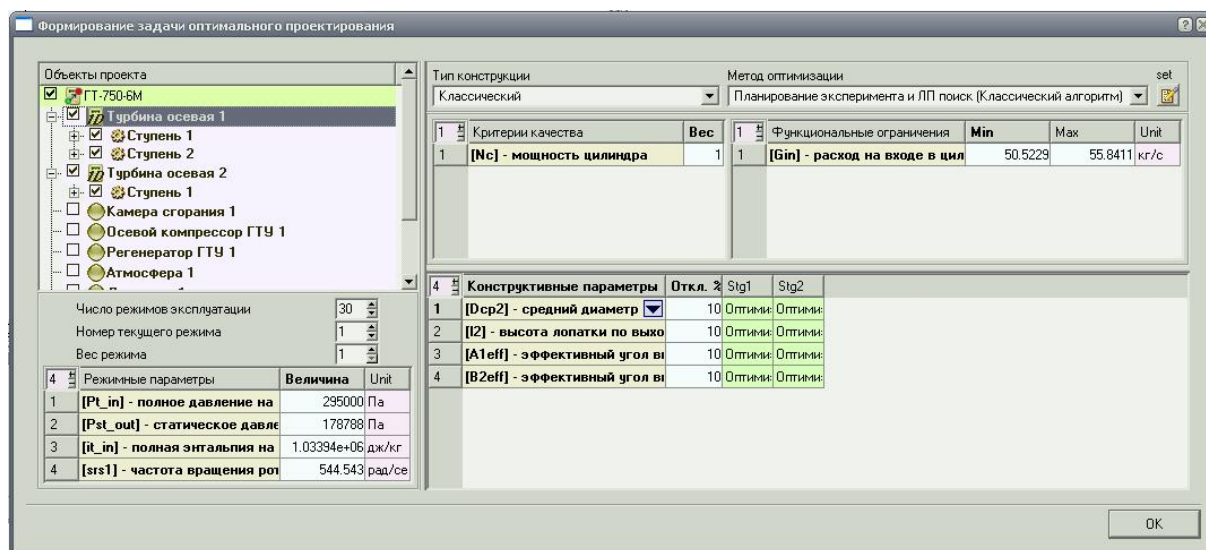


Рис. 1. Диалог формирования сценариев вычислительных процессов в САПР «Турбоагрегат»

Разработанный алгоритм позволяет существенно повысить эффективность газовых турбин и эффективность работы установки в целом на заданных режимах без повышения начальных параметров цикла и может быть использован при проектировании и модернизации турбин ГТУ различных типов и областей применения.

### Описание обновлённого алгоритма оптимального проектирования

Как отмечалось выше, рекурсивный трёхуровневый алгоритм оптимизации ПЧ газовых турбин был разработан на базе многоуровневого алгоритма оптимизации [3] и является логическим продолжением работ, ориентированных на развитие теории оптимального проектирования турбомашин коллективом кафедры турбиностроения НТУ «ХПИ». Основная отличительная особенность нового алгоритма – наличие 3-го, наивысшего уровня («Схема установки») в иерархии процесса проектирования. Добавление нового уровня стало возможным благодаря внедрению в САПР «Турбоагрегат» процедуры создания и расчёта схем ГТУ [5].

Указанная процедура наряду с возможностью осуществления проверочного расчёта различных схем ГТУ позволяет выполнять расчёты газотурбинных схем на переменные режимы работы в 2-х поставках:  $n = \text{const}$  (постоянство числа оборотов силовой турбины на всех режимах эксплуатации, например, для энергетических установок, где  $n = 3000$  об/мин) и  $n = \text{var}$  (обороты силовой турбины изменяются при изменении режима работы установки). В отличие от подобных программ расчёта схем ГТУ, например программный комплекс описанный в [6], данный программный модуль

позволяет пользователю рассмотреть огромное количество различных комбинаций схем (для каждой комбинации элементов схемы автоматически генерируется код расчётной модели) и самостоятельно редактировать сгенерированный программой код если возникает необходимость.

Трёхуровневый оптимизационный алгоритм, также как и алгоритм [3], основывается на блочно-иерархическом представлении процесса проектирования [1] таким образом, что общая оптимизационная задача разнесена на три 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 рисунке 2 показано взаимодействие и распределение задач между локальными уровнями проектирования.

Наивысший уровень в иерархии процесса проектирования – «Схема» (см. рисунок 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. Расчёт схемы ГТУ на заданный график эксплуатационной нагрузки необходим по двум причинам:

1. Как правило, заданными являются режимы работы установки в целом, а значения режимных параметров, которые однозначно определяют режим работы проточной части установки полностью, неизвестны. Например, могут быть известны параметры атмосферного воздуха, мощность установки, начальные параметры продуктов сгорания, а неизвестными, такие параметры как расход рабочего тела и перепады температур и давлений на ПЧ, необходимые для оптимизации ПЧ с учётом режимов эксплуатации.
2. После оптимизации ПЧ агрегата необходимо выполнить расчёт интегральных характеристик установки по режимам эксплуатации. Результаты расчёта позволяют оценить полученный в результате оптимизации ПЧ эффект, а также могут быть использованы в качестве начальных данных для последующих оптимизационных итераций.

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, упрощённые зависимости или данные, приведенные заводом-изготовителем. Причем САПР «Турбоагрегат» предоставляет проектировщику средства для комфортного расчёта, хранения и использования этих характеристик или для использования других данных позволяющих смоделировать рабочий процесс элементов схемы. Так, например, при проведении расчётов схемы ГТУ на различные режимы, для моделирования работы турбин и компрессора (для определения степеней сжатия/расширения –  $\epsilon$  и коэффициентов полезного действия по параметрам торможения –  $\eta$ ) используются универсальные характеристики в координатах  $\frac{G}{G_0} \frac{P_{10}^*}{P_1^*} \sqrt{\frac{T_1^*}{T_{10}^*}}$ ;  $\frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{T_{10}^*}{T_1^*}}$  (где  $G$  – массовый расход газа,  $P^*$  и  $T^*$  – полные давления и температуры на входе, индексом «0» обозначены параметры

соответствующие номинальному режиму работы установки), а для остальных элементов схемы изменение характеристик с изменением режима работы могут не учитываться (приравняться к номинальным). Причём характеристика компрессора может быть построенной по данным завода-изготовителя, а характеристика турбины может быть получена расчётным путём с использованием возможностей САПР «Турбоагрегат».

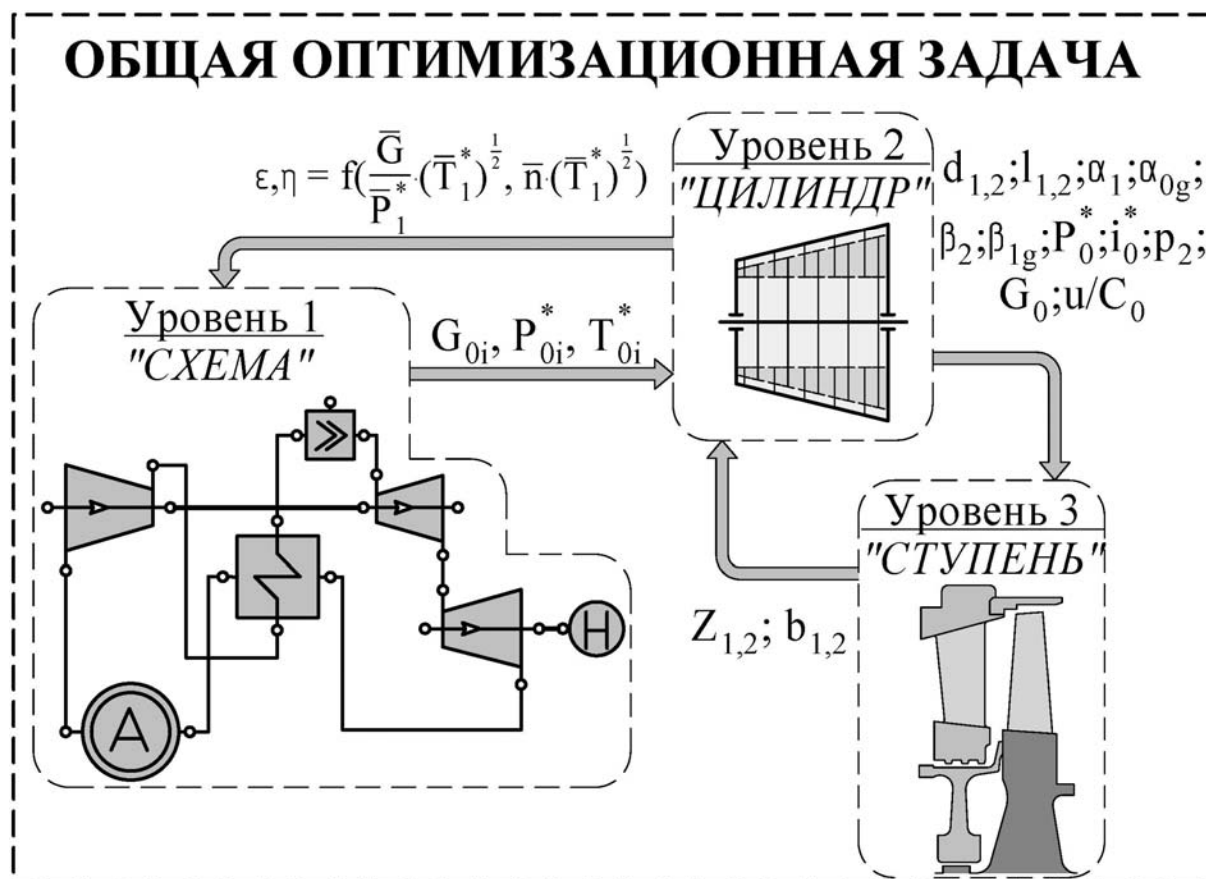


Рис. 2. Распределение задач между локальными уровнями проектирования

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 двух нижних уровнях 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:

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

где  $\vec{q}$  – вектор варьируемых параметров формальной макромодели (ФММ) в нормированном виде;  $Y$  – функция отклика;  $A$  – матрица коэффициентов ФММ;  $n$  – число факторов ФММ. Для построения указанной зависимости, на выбор пользователя, могут быть использованы трёхуровневые планы Бокса-Бенкена [7] или насыщенные планы Рехтшафнера [8]. Поиск оптимального решения осуществляется по зависимости вида (1) с использованием точек ЛП<sub>т</sub> – последовательности [9] (алгоритм поиска оптимальных решений более подробно описан в [3]). На нижнем 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. Причём между уровнями «Цилиндр» и «Ступень» организован рекурсивный информационный обмен, вследствие чего все решения верхнего уровня включают в себя лучшие решения нижнего.

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

#### **Газотурбинные приводы нагнетателей природного газа как перспективные объекты для применения разработанного алгоритма**

Как указано выше, разработанный алгоритм, ввиду универсальности метода расчёта тепловых схем, может быть использован для любых газовых турбин при проектировании и модернизации установок любого назначения (энергетических, авиационных, транспортных и др.). Особо актуальной для газотранспортной системы Украины является возможность использования данного оптимизационного алгоритма для модернизации установок типа ГТН-6, ГТ-750-6, ГТ-6-750, ГПА-Ц-6,3, ГТК-10, ГПУ-10, ГТК-25, которые используются в качестве приводов газоперекачивающих агрегатов. Актуальность такого применения заключается в том, что режимы эксплуатации указанных установок, ввиду ряда причин, существенно отличаются от проектных. Так, например, реальные эксплуатационные нагрузки установки ГТ-750-6М, установленной на Шебелинской магистральной компрессорной станции (агрегат № 8 по станции, № 2 по цеху), колеблются в диапазоне от 52 % до 72 % от номинальной, равной 6 МВт. Кроме того, подобные установки широко распространены в газотранспортной системе Украины (всего около 630 шт.) и более чем на 80 % исчерпали свой ресурс [10]. Согласно концепции государственной научно-технической программы «Создание промышленных газотурбинных двигателей нового поколения для газовой промышленности и энергетики» [10] 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.

Использование разработанного метода при модернизации указанных установок позволит существенно повысить их эффективность без значительных материальных затрат, т.к. стоимость такой модернизации приравнивается к стоимости замены проточных частей газовых турбин и практически не затрагивает остальные дорогостоящие элементы схемы ГТУ такие как компрессор, камера сгорания, регенератор и нагнетатель. Кроме того при изготовлении новых проточных частей нет

необходимости в использовании новых, более дорогих, жаропрочных материалов т.к. не изменяются начальные параметры продуктов сгорания. Высокая эффективность такой модернизации связана с тем, что при её проведении осуществляется индивидуальный подход к каждому агрегату с учётом особенностей его реальных эксплуатационных нагрузок.

### **Выводы**

1. Оптимизация ПЧ газотурбинных установок потребовала введения высшего уровня в алгоритме оптимизации, а именно тепловой схемы. Учёт режимов эксплуатации ГТУ позволяет существенно повысить показатели эффективности как вновь создаваемых, так и модернизируемых агрегатов.
2. Добавление нового уровня в оптимизационный алгоритм существенно расширяет возможности его использования, а именно:
  - позволяет рассчитывать недостающие значения режимных параметров, однозначно определяющих режим работы 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 (если они необходимы).
3. САПР «Турбоагрегат», разрабатываемый на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ», благодаря наличию развитого единого информационного пространства и возможности формировать СВП, позволяет существенно упростить практическую реализацию оптимизационных алгоритмов.

**Список литературы:** 1. *Бойко А.В.* Аэродинамический расчёт и оптимальное проектирование проточной части осевых турбин / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорушенко, 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. Говорушенко, 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. Говорушенко, А.П. Усатый // Электронное моделирование. – К.: Академперіодика. – 2009. – № 2. – С. 43-55. 5. *Бойко А.В.* Интегрирование процедуры создания и расчёта схем ГТУ в САПР «Турбоагрегат» / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорушенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 3. – С. 111-115. 6. *Joachim Kurzke* GasTurb 11: Design and Off-Design Performance of Gas Turbines – Germany, 2007. – 241 p. 7. *Box E.P.* Some new three-level Design for the Study of Quantitative Variables / E.P. Box, D.W. Behnken // Technometrics. – 1960. – № 4. – P. 455-475. 8. *Rechtschaffner R.L.* Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs // Technometrics. – 1967. – № 9. – P. 569-575. 9. *Соболь И.М.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболь, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 108 с. 10. *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.

© Бойко А.В., Говорушенко Ю.Н., Усатый А.П., Руденко А.С., 2010  
Поступила в редколлегию 15.02.10