

УДК 621.165

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

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
г. Харьков, Украина*

### **ИНТЕГРИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ СОЗДАНИЯ И РАСЧЁТА СХЕМ ГТУ В САПР «ТУРБОАГРЕГАТ»**

Описані особливості інтегрування нових компонент до САПР «Турбоагрегат». Виконано інтегрування процедури створення та розрахунку схем ГТУ до САПР. Для перевірки працездатності зазначеної процедури проведені розрахунки та оптимізація параметрів циклу ГТ-750-6М. Наведені результати розрахунків та оптимізації.

Features of integration of new components to CAD «Turboaggregate» were described. Integration of procedure of creation and calculation of gas turbine installation diagram to CAD was executed. For procedure operation test the calculation and optimization of cycle parameters of GT-750-6M were performed. Results of calculations and optimization are resulted.

В связи с ограниченностью природных ресурсов и постоянным увеличением их стоимости к создаваемым турбоустановкам выдвигают очень высокие требования, особенно касательно их эффективности. Для удовлетворения этих требований на этапе проектирования новых установок, должны быть использованы новые методы и подходы, реализованные в рамках систем автоматизированного проектирования (САПР). Благодаря современному уровню развития вычислительной техники, в рамках новых САПР, имеется возможность усложнить постановки задач оптимального проектирования, рассмотреть весь комплекс энергетического оборудования проектируемой установки, а также учесть взаимное влияние объектов проектирования.

Исходя из обзора современных САПР (применительно к турбоагрегатам), можно сделать вывод, что большинство из них посвящены, как правило, только одному объекту установки (турбина, камера сгорания, компрессор). Такие системы проектирования являются достаточно эффективными, однако они не позволяют учесть взаимное влияние объектов проектируемого агрегата. Также существуют алгоритмы проектирования, которые имеют достаточно сложную, иерархическую структуру, позволяющую включить в рассмотрение тепловую схему установки [1, 2].

Отличительной особенностью разрабатываемой на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ» САПР «Турбоагрегат» [3–5] является возможность широкого использования для существующих алгоритмов проектирования отдельных агрегатов, постоянного расширения и усложнения постановок решаемых задач путём быстрого внедрения различных процедур (например: математических моделей, оптимизационных алгоритмов), добавления объектов и уровней проектирования.

В данной статье описаны особенности интегрирования процедуры расчёта и создания схем ГТУ в САПР «Турбоагрегат». Внедрение указанной проектной процедуры связано со значительным расширением возможностей САПР и позволяет:

- в рамках одной программы определять интегральные параметры спроектированной установки (такие как эффективность, полезная мощность, расход топлива и т.д.) на номинальном и переменных режимах;

- добавить новый уровень в иерархию алгоритма оптимального проектирования [6], с помощью которого можно определить оптимальные значения параметров цикла ГТУ;
- оценить влияние каждого элемента цикла на его эффективность и взаимное влияние элементов.

### Особенности интегрирования процедур в САПР «Турбоагрегат»

В САПР для создания информационной согласованности между различными моделями проектных и расчётных процедур используется единое интегрированное информационное пространство (ИИП) [3, 5]. Таким образом, для реализации возможности использования новой процедуры в рамках САПР достаточно обеспечить информационную согласованность между данной процедурой и ИИП. Для этого структуры входных и выходных параметров процедуры, внедряемой в САПР, должны входить в ИИП в качестве его элементов, а связи между параметрами объектов проектирования с аналогичными параметрами из общего информационного пространства проекта входят в ИИП как атрибуты этих элементов.

Все элементы ИИП, их связи и свойства содержатся в информационной базе данных ресурсов САПР «Турбоагрегат» (ИБДР), которая используется для формирования коллекции динамических словарей при загрузке программы [3]. Динамические словари, в свою очередь, обеспечивают функционирование всех подсистем и компонентов, как единой управляемой и согласованной системы. Внесение информации о структуре и связях подключаемой процедуры в ИБДР САПР выполняется с помощью специального редактора ресурсов.

Таким образом, для интегрирования процедуры создания и расчёта схемы ГТУ в САПР «Турбоагрегат», необходимо выполнить следующие действия:

- С помощью редактора ресурсов добавить в список проектных процедур и моделей подключаемую процедуру. Как показано на рис. 1, под данной процедурой создать структуру объектов и параметров, соответствующую структуре входных и выходных параметров подключаемой программы.

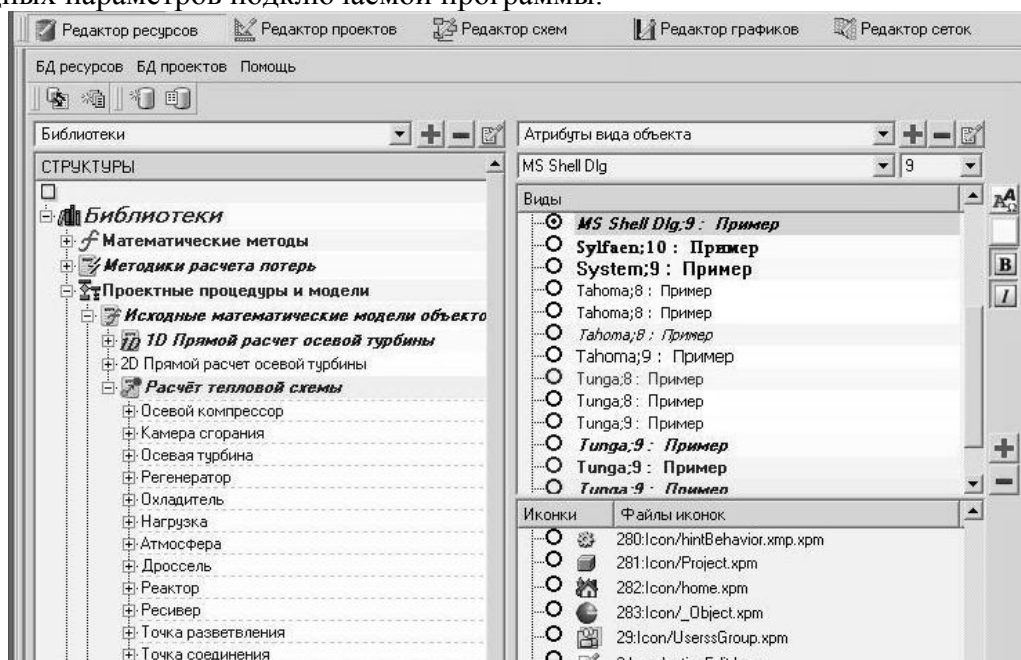


Рис. 1. Добавление новой процедуры и её структуры с помощью редактора ресурсов в список проектных процедур ИБДР

- Установить параметрические связи между входными и выходными параметрами процедуры и параметрами соответствующих объектов проектирования, которые содержатся в управляющих иерархических структурах «Объекты проектирования» [3] (рис. 2).

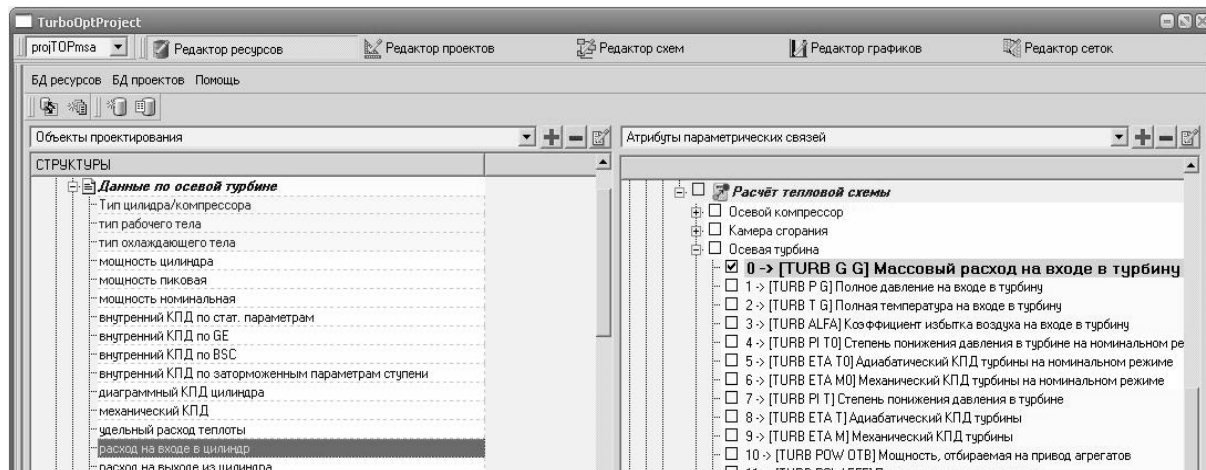


Рис. 2. Создание параметрических связей с помощью редактора ресурсов

- Создать программный модуль для заполнения структур входными данными из активного проекта при создании схемы ГТУ, а также для внесения в общее информационное пространство проекта выходных данных, которые представляют собой результаты работы подключаемой процедуры. Разработка указанного программного модуля существенно облегчается благодаря наличию коллекции динамических словарей, которые содержат всю необходимую информацию (о структуре активного проекта, о структуре данных каждого элемента проекта и подключаемой процедуры, о связях каждого параметра проекта и т.д.).

### Создание и оптимизация схемы установки ГТ-750-6М в рамках САПР «Турбоагрегат»

Проверка работоспособности процедуры расчёта газотурбинных циклов, а также проверка эффективности заложенного в указанную процедуру алгоритма оптимизации были выполнены применительно к установке ГТ-750-6М. Данные ГТУ широко распространены и используются в качестве приводов газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях [7]. Используя данные из технической документации ГТ-750-6М в САПР «Турбоагрегат» был создан проект установки. Затем под данный проект была сгенерирована тепловая схема (схема создаётся автоматически путём вызова процедуры создания и расчёта схем ГТУ). Графическое отображение активного проекта и созданной схемы в САПР показано на рис. 3. Как видно из рис. 3, в состав ГТ-750-6М входят: компрессор, камера сгорания, турбина высокого давления (для привода компрессора), силовая турбина низкого давления (для привода центробежного нагнетателя), регенератор. Наличие дросселя (рис. 3) в тепловой схеме установки позволяет учесть потери давления воздуха перед компрессором (связанные с забором воздуха из атмосферы, с прохождением воздухоочистителя и входного патрубка компрессора). Данная компоновка элементов тепловой схемы весьма эффективна для газоперекачивающих агрегатов [8], однако, её проектный КПД, в связи с низкой эффективностью элементов схемы, составляет всего 27 %.

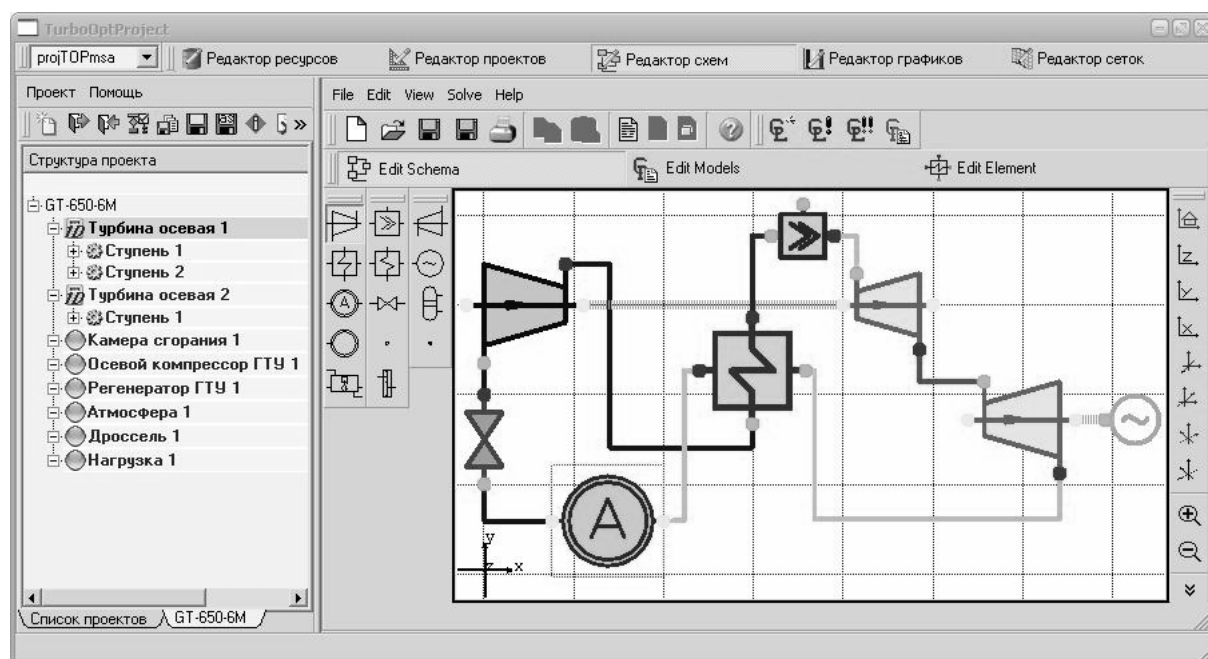


Рис. 3. Отображение окна активного проекта (слева), а окна проектирования и анализа схем ГТУ (справа)

В табл. приведены результаты расчёта схемы ГТ-750-6М, выполненные в рамках САПР «Турбоагрегат», и данные из технической документации агрегата. Из табл. видно, что значения, полученные в результате расчёта схемы с достаточной точностью совпадают с проектными (приведенными изготовителем в технической документации), что свидетельствует о достаточной степени адекватности модели расчёта схем ГТУ.

Таблица. Результаты расчёта схемы ГТ-650-6М

Наименование параметра	Данные из технической документации	Расчёт исходного варианта схемы	Расчёт оптимизированного варианта схемы
Степень повышения давления в компрессоре	4,5000	4,4993	5,4563
Массовый расход воздуха на выходе из компрессора, кг/с	52,80	48,82	46,99
Мощность, потребляемая компрессором, Вт	–	$9,10 \cdot 10^6$	$10,18 \cdot 10^6$
Массовый расход топлива (природного газа), кг/с	0,520–0,560	0,555	0,549
Температура газа на входе в турбину, °С	765	765	765
Полезная мощность установки, Вт	$6,00 \cdot 10^6$	$6,03 \cdot 10^6$	$6,03 \cdot 10^6$
КПД установки, %	27,00	27,01	27,35

После расчёта схемы ГТ-750-6М была выполнена оптимизация цикла с целью определения оптимальных значений параметров цикла при фиксированной температуре газа на выходе из камеры сгорания. В качестве оптимизируемого параметра была выбрана степень понижения давления продуктов сгорания в турбине высокого давления. Результаты оптимизации сведены в таблице. Как видно из таблицы оптимальная степень сжатия в цикле превышает исходную на 21,27 %. Таким образом, при прочих равных условиях, выбор оптимальной степени расширения в турбине,

сидящей на одном валу с компрессором, позволил повысить эффективность установки на 0,34 %.

### **Выводы**

1. Рассматриваемый САПР «Турбоагрегат», благодаря наличию редактора ресурсов, является открытой системой проектирования, что позволяет существенно упростить процессы интегрирования новых процедур, объектов проектирования, атласов, справочников и других элементов в подсистемы САПР.

2. Наличие процедуры создания и расчёта схем ГТУ в рамках САПР позволит выполнить глубокий анализ цикла ГТУ с целью выявления скрытых резервов повышения её эффективности.

3. Положительный результат оптимизации для установки ГТ-650-6М (прирост КПД составил 0,34 %) свидетельствует о целесообразности и необходимости включения процедуры выбора оптимальной степени расширения в турбине, которая расположена на одном валу с компрессором, в качестве высшего уровня в алгоритм многоуровневой оптимизации [4].

### Литература

1. *Hongde J.* A Precise Full-Dimensional Design System for Multistage Steam Turbines / J. Hongde, X. Kepeng, L. Baoqing, X. Xinzhong and C. Qing // Proceedings of GT2007 ASME Turbo Expo 2007, Montreal, May 14-17. – Montreal, 2007, GT2007-27195. – 10 p.

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.* 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.

4. *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 // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – № 5. – С. 36-42.

5. *Бойко А.В.* Особенности информационного обмена в рамках единого информационного пространства САПР «Турбоагрегат» / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 2. – С. 11-15.

6. *Бойко А.В.* Многоуровневая оптимизация параметров проточной части осевых турбин с учётом переменного режима работы / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 2. – С. 26-30.

7. *Мороз А.П.* Газоперекачивающие агрегаты и обслуживание компрессорных станций / А.П. Мороз, И.И. Мальцуров, К.Г. Арустамов и др. – М.: Недра, 1979. – 229 с.

8. *Котляр И.В.* Переменный режим работы газотурбинных установок. – М.: Машгиз, 1961. – 218 с.