

УДК 621.438.001.3:51

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30875

# АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОВАЛЬНОГО ГТД Д045 К СИСТЕМЕ ОПТИМИЗАЦИИ ОРТИМУМ

**И. Е. Аннопольская**

Кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник\*

E-mail: anna@ipmach.kharkov.ua

**А. Л. Лютиков**

Инженер-конструктор II категории  
группы расчётных статических характеристик ГТУ\*\*

Отдел расчетно-экспериментальных  
характеристик и регулирования ГТД

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

**А. А. Тарелин**

Доктор технических наук, профессор  
член-корреспондент НАН Украины, заведующий отделом\*

E-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua

**В. Н. Чобенко**

Кандидат технических наук, зам. генерального конструктора,  
начальник конструкторского отделения

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

\*Отдел общетехнических исследований в энергетике

Институт проблем машиностроения  
им. А. Н. Подгорного НАН Украины

ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

\*\*ГП Научно-производственный комплекс  
газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект»

пр. Октябрьский, 42 а, г. Николаев, Украина, 54018

*Викладено результат адаптації математичної моделі газотурбінного двигуна (ГТД) до програмного комплексу оптимізації та ідентифікації параметрів та характеристик енергетичних установок. Описано вибір варійованих і контрольованих параметрів. Представлений результат розв'язання тестової задачі ідентифікації. Наведено принципи подальшого вдосконалення методології завдання діапазонів зміни варійованих і контрольованих параметрів*

*Ключові слова: математична модель, ідентифікація, ГТД, варійовані параметри, контрольовані параметри, функція цілі*

*Изложен результат адаптации математической модели газотурбинного двигателя (ГТД) к программному комплексу оптимизации и идентификации параметров и характеристик энергетических установок. Описан выбор варьируемых и контролируемых параметров. Представлен результат решения тестовой задачи идентификации. Приведены принципы дальнейшего совершенствования методологии задания диапазонов изменения варьируемых и контролируемых параметров*

*Ключевые слова: математическая модель, идентификация, ГТД, варьируемые параметры, контролируемые параметры, функция цели*

## 1. Введение

Процессы проектирования и доводки ГТД базируются на использовании математических моделей (ММ), отражающих физическую картину процессов функционирования двигателя. Одним из путей повышения достоверности ММ является её идентификация по результатам стендовых испытаний двигателя. Использование идентифицированных ММ ГТД позволяет определять причины отклонения параметров двигателя от проектных значений [1].

Процесс идентификации ММ современных энергетических ГТД представляет собой весьма трудоёмкую задачу в силу необходимости идентифицировать основные контролируемые параметры (характеристики) (5...10 величин), определяемые в ходе эксперименталь-

ных исследований, зависящие от большого количества параметров (30...40 величин), неконтролируемых в ходе эксперимента, значения которых могут варьироваться в процессе идентификации. В связи с этим применение программного комплекса (ПК) идентификации по результатам стендовых испытаний, позволяющего снизить трудоёмкость указанных работ, является достаточно актуальной задачей.

Во время проведения доводочных работ по ГТД Д045 возникла необходимость идентификации его ММ по результатам стендовых испытаний. Данная статья посвящена первому этапу работ по совершенствованию доводки двигателя. В ней представлены результаты адаптации ММ ГТД к ПК оптимизации и результаты решения тестовой задачи идентификации.

## 2. Анализ литературных данных

В различных странах мира широкое распространение получили CAE-технологии – специализированные системы моделирования для определённого класса технических объектов. В частности при проектировании и доводке ГТД применяются GASTURB, GECAT, JCTS, GSP, ГРАД, АСТРА.

Система GASTURB 12, разработанная университетом г. Мюнхен, Германия, обладает широким функционалом для расчёта и анализа характеристик ГТД различных конструктивных схем. Несмотря на возможность задания характеристик компрессора и турбины на основании экспериментальных данных отдельный модуль идентификации не предусмотрен [2, 3].

Система GECAT (Graphical Engine Cycle Analysis Tool) – это программное обеспечение (разработка университета Алабама, США) предназначенное для расчёта и анализа циклов воздушно-реактивных двигателей (ВРД) [4]. GECAT сопровождает процесс разработки и анализа параметров ВРД без возможности идентификации ММ по результатам испытаний.

Система GSP (Gasturbine Simulation Program, разработка: Голландия) GSP применяется для структурного и параметрического анализа двигателя на этапе предпроектных исследований, и не может применяться при проведении доводочных работ [5].

В работах [6, 7] представлены основные сведения о ПК ГРАД, разработанном в Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева. Комплекс обеспечивает выполнение большинства газотермодинамических расчётов параметров рабочего тела в проточной части газотурбинных двигателей на различных этапах жизненного цикла, включая проектирование, испытания, доводку, серийное производство и эксплуатацию.

Комплекс ГРАД включает в себя модуль идентификации, предназначенный для повышения точности ММ, а также в целях построения моделей конкретных ГТД.

В работе [8] представлена информация о разработанном варианте автоматизированной системы газотермодинамических расчётов и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей, предназначена для проектирования ГТД и его доводки. Она включает в себя подсистему идентификации параметров АСТРА-ИД.

Особенностью описанных ПК является работа с конкретными ММ, реализованными и функционирующими только в их составе. Данное обстоятельство не позволяет осуществлять идентификацию ММ, созданных сторонними разработчиками с помощью других программных средств с учётом практических наработок конкретного инженера-исследователя.

В реальных прикладных задачах наиболее широко применяются методы параметрической идентификации, когда уточнение ММ достигается только за счет изменения величин коэффициентов влияния (параметров), без корректировки ее структуры.

К используемым методам параметрической идентификации ММ можно отнести такие как: наименьших квадратов и его модификации; максимального правдоподобия; группового учета аргументов; уравнивания и др. [9].

Одним из основных недостатков этих методов является необходимость линеаризации математической

модели исследуемого объекта, что приводит к значительным отклонениям от реальных оценок.

Учитывая вышесказанное, представляется актуальной адаптация ММ ГТД к ПК оптимизации и идентификации параметров и характеристик энергетических установок, разработанному в ИПМаш НАН Украины [10], позволяющему вести расчет критериев идентификации, параметров и характеристик исследуемого объекта по тем же уравнениям, что и при проектировании ГТД.

## 3. Цели и задачи исследования

Целью проведенного исследования являлось подтверждение возможности использования ПК оптимизации и идентификации параметров и характеристик энергетических установок Optimum, разработанного в ИПМаш НАН Украины, для идентификации ММ ГТД Д045 по результатам стендовых испытаний.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- согласование работы ММ ГТД Д045 и ПК оптимизации Optimum;
- решение тестовой задачи идентификации в конкретно заданной точке, с целью подтверждения возможности их совместной работы.

## 4. Постановка задачи исследования

Задача идентификации по результатам стендовых испытаний решается для поузловой нелинейной ММ ГТД Д045 с детализацией расчета турбинного тракта до уровня лопаточных венцов [11]. В соответствии с классификацией [9], по уровню сложности она представляет собой модель второго уровня.

В структуру ММ включены:

- характеристика входного устройства в виде:

$$\Delta P_{\text{ВХ}} = P_{\text{ВХ}} \cdot A_{\text{ВХ}} \cdot \left( \frac{G_{\text{ВХ}} \sqrt{T_{\text{ВХ}}}}{P_{\text{ВХ}}} \right)^2, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ВХ}}$  – полное давление воздуха на входе в воздухоприемное устройство, Па;  $A_{\text{ВХ}}$  – коэффициент пропорциональности;  $G_{\text{ВХ}}$  – расход воздуха на входе в воздухоприемное устройство, кг/с;  $T_{\text{ВХ}}$  – температура торможения воздуха на входе в воздухоприемное устройство, К;

- характеристика осевого компрессора в виде:

$$\dot{K}, n_{\text{Кпр}} = f(G_{\text{Впр}}, \dot{K}),$$

где  $\eta \dot{K}$  – адиабатический КПД компрессора;  $n_{\text{Кпр}}$  – приведенная частота вращения ротора компрессора, об/мин;  $G_{\text{Впр}}$  – приведенный расход воздуха на входе в компрессор, кг/с;  $\pi \dot{K}$  – степень повышения полного давления воздуха в компрессоре;

- зависимость потерь полного давления в камере сгорания в виде:

$$\Delta P_{\text{КС}} = \Delta P_r + \Delta P_t = P_{02} \cdot A_{\text{КС}} \cdot \left( \frac{G_{\text{КС}} \sqrt{T_{02}}}{P_{02}} \right)^2 + \frac{\rho_2 W^2}{2} \cdot \left( \frac{T_{03}}{T_{02}} - 1 \right), \quad (3)$$

где  $\Delta P_T$  – гидравлические потери полного давления рабочего тела в камере сгорания, Па;  $\Delta P_T$  – потери полного давления рабочего тела в камере сгорания, вызванные подводом тепла, Па;  $P_{02}$  – полное давление воздуха на входе в камеру сгорания, Па;  $A_{KC}$  – коэффициент пропорциональности;  $G_{KC}$  – расход воздуха на входе в камеру сгорания, кг/с;  $T_{02}$  – температура торможения воздуха на входе в камеру сгорания, К;  $\rho_2$  – плотность воздуха на входе в камеру сгорания, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – скорость воздуха на входе в камеру сгорания, м/с;  $T_{03}$  – температура торможения газа на выходе из камеры сгорания, К;

$$\Delta P_{\text{ВЫХ}} = P_4^* \cdot A_{\text{ВЫХ}} \cdot \left( \frac{G_T \sqrt{T_4^*}}{P_4^*} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{\sin \alpha_{\text{ВЫХ}}} \right)^m, \tag{4}$$

где  $P_4^*$  – полное давление газа на выходе из турбины, Па;  $A_{\text{ВЫХ}}$  – коэффициент пропорциональности, (с<sup>2</sup>·Па<sup>2</sup>)/(кг<sup>2</sup>·К);  $G_T$  – расход газа на выходе из турбины, кг/с;  $T_4^*$  – температура торможения газа на выходе из турбины, К;  $\alpha_{\text{ВЫХ}}$  – угол выхода потока газа из турбины ГТД, рад;  $m$  – показатель степени, определяемый на основании статистических данных по результатам экспериментальных исследований характеристик ГТД;

$$\eta_{\text{РЕД}} = f(N_{\text{РЕД}}), \tag{5}$$

где  $\eta_{\text{РЕД}}$  – КПД электрогенератора;  $N_{\text{РЕД}}$  – мощность на выходном валу редуктора, кВт;

$$\eta_{\text{ЭГЕН}} = f(N_{\text{ЭЛ}}), \tag{6}$$

где  $\eta_{\text{ЭГЕН}}$  – КПД электрогенератора;  $N_{\text{ЭЛ}}$  – электрическая мощность на клеммах электрогенератора, кВт;

– системы отборов и подводов воздуха для охлаждения «горячих» узлов и для регулирования давлений в полостях двигателя.

Параметры вдоль проточной части турбины определяются на основании геометрических характеристик её венцов.

Для решения задачи в ММ необходимо выделить варьируемые и контролируемые параметры двигателя, а также определить функции цели.

В качестве контролируемых параметров выбраны наиболее важные расчетные характеристики двигателя, измерения которых произведены в процессе эксперимента. В данном случае выбраны следующие параметры: электрическая мощность, расход воздуха на входе в двигатель, расход топливного газа, потери полного давления в воздухоприёмном устройстве, полное избыточное давление воздуха за компрессором, полная температура воздуха за компрессором, полное абсолютное давление газа за турбиной и полная температура газа за турбиной (всего 8 параметров).

При решении тестовой задачи диапазоны изменений контролируемых переменных

назначены исходя из требований к точности измерительного оборудования (погрешности измерений) в соответствии со стандартом ISO 2314:2009.

Варьируемые параметры обычно выбираются из числа наименее достоверных параметров модели, для рассматриваемой ММ это коэффициенты моделирования характеристики компрессора, величины горла сопловых аппаратов и рабочих колёс турбины, коэффициенты пропорциональности потерь полного давления в воздухоприёмном и газоотводящем устройствах и камере сгорания, относительное количество охлаждающего воздуха в сопловых и рабочих венцах турбины, а также коэффициенты потерь энергии в них (всего 37 величин).

Для этих варьируемых параметров заданы симметричные диапазоны изменений от ±1 % до 5 %.

Целевые функции (критерии идентификации) представлены величинами перечисленных выше контролируемых параметров, определяемых по ММ, диапазон изменения которых устанавливается по результатам прямых измерений параметров потока по тракту двигателя, полученных при стендовых испытаниях.

Задача идентификации в данном случае представляет собой минимизацию ряда целевых функций (критериев идентификации), в процессе решения которой, для каждого из рассматриваемых контролируемых параметров сводится к минимуму расхождение значений, полученных по результатам испытаний двигателя и расчета по ММ в заданном диапазоне отклонений (не более ±1,20 %). Т.е. по сути решается задача многокритериальной условной оптимизации.

### 5. Экспериментальное определение теплотехнических характеристик газотурбинного двигателя (ГТД)

Испытания ГТД Д045 в составе газотурбинной энергетической установки ГТЭ-60 проводились на экспериментальном стенде бокса № 1 цеха № 180 в составе газотурбинной электростанции с выдачей электроэнергии в сеть.

Схема препарировки ГТД на экспериментальном стенде представлена на рис. 1.

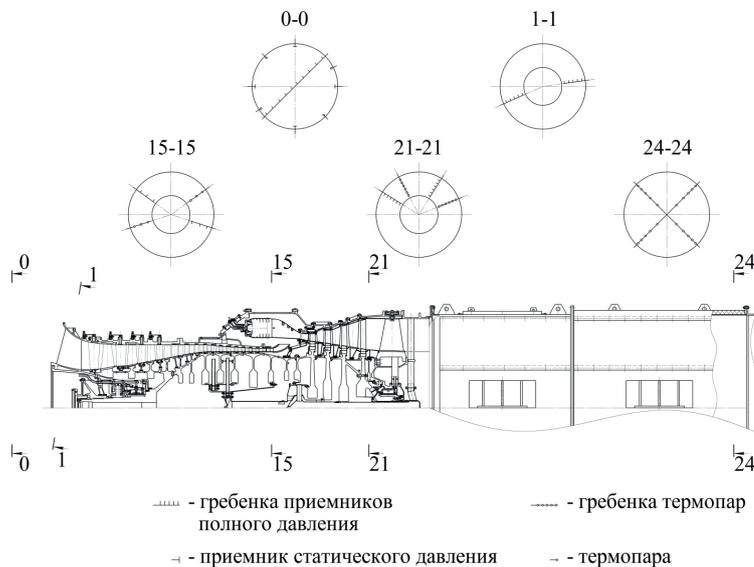


Рис. 1. Схема препарировки ГТД на экспериментальном стенде

Для определения теплотехнических характеристик двигателя в процессе испытаний измерялись следующие параметры:

- атмосферное давление воздуха;
- температура воздуха на входе в двигатель (в четырёх точках замера, сечение 0–0);
- расход воздуха на входе в компрессор (при помощи расходомерного коллектора, сечение 0–0);
- полное избыточное давление воздуха в переднем корпусе компрессора (в двух точках замера гребёнками приёмников полного давления, сечение 1–1);
- полная температура воздуха за компрессором (в двух точках замера гребёнками термомпар, сечение 15–15);
- полное избыточное давление воздуха за компрессором (в двух точках замера гребёнками приёмников полного давления, сечение 15–15);
- полная температура газа за турбиной (две гребёнки термомпар для определения температурного поля по высоте проточной части, сечение 21–21);
- полное избыточное давление газа за турбиной (в двух точках замера гребёнками приёмников полного давления, сечение 21–21);
- полная температура газа за турбиной в диффузоре ГТД (в двух точках замера гребёнками термомпар, сечение 24–24);
- активная мощность генератора;
- частота вращения ротора турбокомпрессора;
- расход топлива.

Электрическая мощность, расход топливного газа и атмосферное давление воздуха определялись штатными замерами системы автоматического управления и регулирования двигателя.

### 6. Адаптация математической модели к системе оптимизации Optimum и результаты решения тестовой задачи идентификации

Решение задачи идентификации проводилось с использованием разработанного в ИПМаш им. А. Н. Подгорного НАН Украины модельно-программного комплекса многоцелевой и многоуровневой оптимизации Optimum. Отличительной особенностью данного комплекса является решение задачи без каких-либо преобразований ММ, т. е. расчет критериев идентификации, параметров и характеристик двигателя ведется по тем же алгоритмам, что и при проектировании. В модельно-программном комплексе Optimum также использован разработанный в ИПМаш НАН Украины алгоритм многокритериальной оптимизации, позволяющий избежать свертки в аддитивный критерий выбранных критериев идентификации, что даёт возможность получить наилучшее значение для каждой рассматриваемой функции качества, а не путем улучшения одной из них за счет ухудшения других.

Для согласования работы программ выполнена организация передачи массивов варьируемых и контро-

лируемых параметров между управляющей (Optimum) и управляемой (ММ ГТД Д045) программами. Эта передача реализована посредством применения динамически связываемой библиотеки (dynamic link libraries (DLL)). Использование DLL позволяет организовать передачу данных между программами, написанными на различных языках программирования не внося существенных изменений в их программный код.

Структурная схема решения задачи идентификации по методике, разработанной в ИПМаш НАН Украины, приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема алгоритма идентификации

Для проверки корректности выполненной адаптации ММ к системе Optimum решена задача идентификации в конкретно заданной точке. Результат решения тестовой задачи представлен в табл. 1.

Таблица 1  
Результат решения тестовой задачи

Контролируемый параметр	Заданное отклонение, %	Полученное отклонение, %
Электрическая мощность на клеммах электрогенератора	+1	0,000
Действительный расход воздуха через двигатель	±0,50	-0,517
Расход топлива	±1,20	-0,658
Потери полного давления в воздухоприёмном устройстве	0–0,40	-0,027
Полное избыточное давление воздуха за компрессором	0–0,40	-0,030
Полная температура воздуха за компрессором	±1	-0,699
Полное абсолютное давление газа за турбиной	0–0,40	-0,002
Полная температура газа за турбиной в диффузоре ГТД	±1	-0,962

Полученные результаты решения тестовой задачи показывают возможность и целесообразность использования системы Optimum для идентификации ММ ГТД Д045 по результатам стендовых испытаний.

### 5 Выводы

Выполнена адаптация математической модели ГТД Д045 к ПК оптимизации и идентификации параметров и характеристик энергетических установок Optimum, разработанному в ИПМаш НАН Украины, и решена задача идентификации в конкретно заданной точке. Показана возможность и целесообразность использования системы Optimum для идентификации ММ ГТД Д045 при его доводке.

Подчеркнем, что проведенные исследования являются первым шагом к созданию адекватной ММ ГТД Д045. Дальнейшей доработки требуют как сама ММ, так и методологические подходы к решению задачи идентификации.

В первую очередь необходимо разработать методологию задания диапазонов изменения варьируемых и контролируемых параметров, которая позволяла бы учитывать несимметричность возможных отклонений от средних значений. Она должна базироваться не только на погрешности измерительного оборудования, и законе нормального распределения отклонений геометрических размеров изготавливаемой проточной части ГТД, но и на результатах измерений фактической материальной части, расходов охлаждающего воздуха, проливов сопловых аппаратов, данных карт сборок, а также на опыте и логике исследователя-разработчика. Такая методология позволит получить максимально адекватную ММ и с высокой вероятностью определять причины отклонения параметров ГТД от проектных значений.

В дальнейшем необходимо провести идентификацию ММ в широком диапазоне режимов работы двигателя, что позволит расчётным путём определять характеристики ГТД во всем диапазоне эксплуатационных режимов.

### Литература

1. Аннопольская, И. Е. Идентификация параметров математических моделей газотурбинных двигателей по результатам испытаний на этапах проектирования и доводки [Текст] / И. Е. Аннопольская, Ю. П. Антипцев, В. В. Паршин и др. // Проблемы машиностроения. – 2004. – Т. 7, № 3. – С. 3–8.
2. Kurzke, J. GasTurb 12. Design and Off-Design Performance of Gas Turbines [Electronic resource] / Available at: <http://www.gasturb.de/manual.html>
3. Kurzke, J. About Simplifications in Gas Turbine Performance Calculation [Text] / J. Kurzke // Proceeding of ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air. – Montreal, Canada (GT2007-27620), 2007. – P. 9.
4. GECAT [Electronic resource] / Available at: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2000-3893>.
5. GSP 11 User Manual [Electronic resource] / Available at: <http://www.gspsteam.com>.
6. Морозов, С. А. Программный комплекс ГРАД – газодинамические расчёты авиационных двигателей [Текст] : сб. докл. науч.-практ. Конф. / С. А. Морозов // Авиакосмические технологии и оборудование. – Казань: КГТУ, 2003. – С. 190–196.
7. Программный комплекс ГРАД [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://grad.kai.ru>
8. Ткаченко, А. Ю. Автоматизированная система газотермодинамических расчётов и анализа (АСТРА-4) газотурбинных двигателей и энергетических установок [Текст] : матер. док. межд. науч.-техн. конф. / А. Ю. Ткаченко, В. С. Кузьмичев, В. В. Кулагин, И. Н. Крупенич, В. Н. Рыбаков // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. – Самара: СГАУ, 2009. – В 2 ч. Ч2. – С. 80–82.
9. Дружинин, Л. Н. математическое моделирование ГТД на современных ЭВМ при исследовании параметров и характеристик авиационных двигателей [Текст] / Л. Н. Дружинин, Л. И. Швец // Труды ЦИАМ. – 1979. – № 832. – С. 45.
10. Тарелин, А. А. Информационно-инструментальная система для решения задач оптимизации и идентификации при проектировании и доводке энергетических установок [Текст] / А. А. Тарелин, И. Е. Аннопольская, Ю. П. Антипцев, В. В. Паршин // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – 2012. – № 8. – С. 17–25.
11. Синкевич, М. В. Совершенствование метода исследования и доводки газодинамических характеристик судовых ГТД на базе высокоинформативной математической модели [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05/ М. В. Синкевич. – Защищена 26.09.88; Утв: 09.11.88. – Николаев, 1988. – 214 с.
12. Чобенко, В. Н. Математическая модель одновального ГТД Д045 [Текст] / В. Н. Чобенко, Р. В. Палиенко, А. Л. Лютиков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 3, № 12(63). – С. 18–21. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/14872/12675>.