

<sup>1</sup> А. А. Тарелин, д-р техн. наук

<sup>1</sup> И. Е. Аннопольская, канд. техн. наук

<sup>2</sup> А. Л. Лютиков

<sup>1</sup> Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков,

e-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua,

anna@ipmach.kharkov.ua

<sup>2</sup> ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев,

e-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

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

УДК 621.438.001.3:51

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭТАПЕ ДОВОДОЧНЫХ РАБОТ

*Наведено результат адаптації математичної моделі енергетичного газотурбінного двигуна (ГТД) до модельного програмного комплексу багаточільової та багаторівневої оптимізації Optimit. Описано вибір варійованих і контрольованих змінних і діапазони їх змін. Наведено результат розв'язання тестової задачі ідентифікації математичної моделі ГТД за результатами стендових випробувань. На основі аналізу отриманих результатів розроблені рекомендації щодо підвищення достовірності результатів ідентифікації.*

### 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].

Идентификация ММ современных энергетических ГТД представляет собой весьма трудоемкую задачу в силу необходимости идентифицировать основные контролируемые параметры (характеристики) (5–10 величин), определяемые в ходе экспериментальных исследований, которые зависят 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 трудоемкость указанных работ, является достаточно актуальным.

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.

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, GSP, JCTS, ГРАД, АСТРА [2–8].

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: 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.

### **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 проведено:

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

### **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.

Подробно структура модели описана в работе [12].

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  $\pm 1$  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 (критерии 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  $\pm 1,20\%$ ), т. е. по сути решается задача многокритериальной условной оптимизации.

**Экспериментальное определение теплотехнических характеристик газотурбинного двигателя (ГТД)**

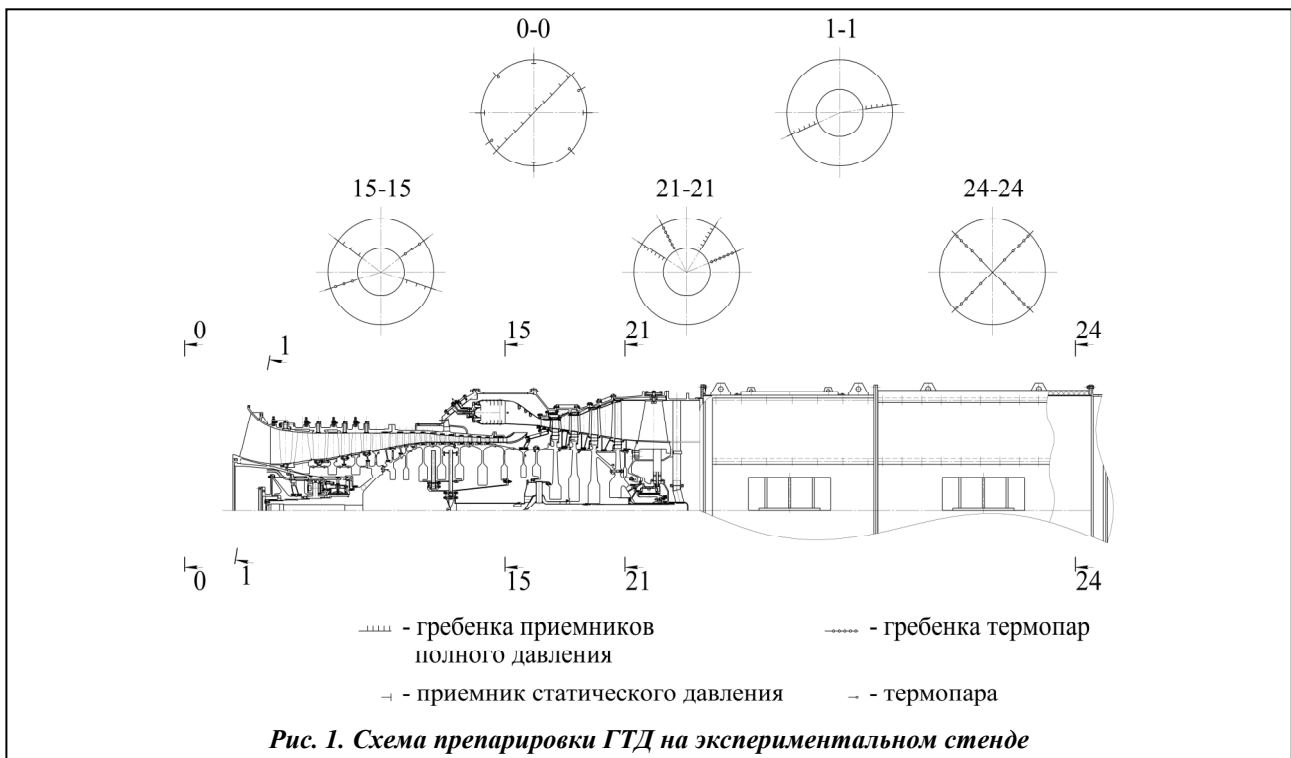
Испытания ГТД Д045 в составе газотурбинной энергетической установки ГТЭ-60 проводились на экспериментальном стенде бокса № 1 цеха № 180 в составе газотурбинной электростанции с выдачей электроэнергии в сеть.

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

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 термопар, 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 термопар 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 термопар, 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.



**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 контролируемых 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.

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

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



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	$\pm 0,50$	-0,517
расход топлива	$\pm 1,20$	-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	$\pm 1$	-0,699
полное абсолютное давление газа за турбиной	0-0,40	-0,002
полная температура газа за турбиной в диффузоре ГТД	$\pm 1$	-0,962

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

### Пути повышения достоверности результатов идентификации

#### *Предварительная обработка результатов эксперимента*

Предварительная подготовка данных является эффективным способом получения адекватной модели ГТД [13]. Существует несколько различных способов предварительной обработки экспериментальных данных с целью получения наиболее значимой информации. К ним относятся фильтрация, удаление избыточных данных и выбросов сигналов.

Запись параметров во время эксперимента осуществляется с частотой 5 опросов в секунду. Для снижения возможных искажений результатов измерений предлагается проводить первичную обработку данных в два этапа:

- 1-й – медианная фильтрация каждую секунду (устранение выбросов);
- 2-й – усреднение полученных значений в интервале 10 секунд.

#### *Использование информации, получаемой при изготовлении конкретного ГТД и его испытаниях*

При формировании массивов варьируемых параметров и диапазонов их изменения необходимо использовать не чертёжные размеры деталей и допуск на их изготовление, а фактические размеры, отражающие индивидуальные особенности конкретного ГТД:

- площади сопловых аппаратов турбины (полученные по результатам проливов);
- величины отборов и возвратов в системе охлаждения турбины (по результатам экспериментальных исследований);
- величины радиальных и диаметральных зазоров вдоль проточной части компрессора и турбины (контролируемые при сборках (разборках) ГТД и занесенные в карту сборки).

Использование радиальных и диаметральных зазоров в расчёте среднего приведенного зазора позволяет в первом приближении оценить отклонение (если такое есть) КПД компрессора и турбины от проектных значений.

#### *Использование априорной информации*

Для ряда измеренных в процессе стендовых испытаний параметров и величин характеристик узлов ГТД характерна несимметричность отклонения от наиболее вероятных (средних) значений.

Отклонение измеренной величины полной температуры рабочего тела в различных сечениях ГТД может принимать относительно небольшие отрицательные значения из-за неравномерности полей скоростей, температур, а также большие положительные значения из-за «затенения» гребёнки термопар, значительного отклонения направления потока от угла установки гребёнки термопар.

Отклонение измеренной величины избыточного давления (разряжение) может принимать относительно небольшие отрицательные значения (положительные для разряжения) из-за неравномерности полей скоростей, давлений, а также большие положительные значения (отрицательные для разряжения) из-за «затенения» гребёнок приёмников полного давления, значительного отклонения направления потока от угла установки гребёнки приёмников полного давления, негерметичности трасс измерений, попадания воды (масла) в капилляры.

КПД лопаточных машин может незначительно отклоняться в большую сторону от проектного значения (из-за меньших зазоров над лопатками относительно проектных значений) и значительно изменяться в меньшую сторону (из-за увеличения зазоров, загрязнения проточной части в процессе испытаний).

### 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.

На основе анализа полученных результатов разработаны рекомендации по повышению достоверности результатов идентификации.

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. *Идентификация* параметров математических моделей газотурбинных двигателей по результатам испытаний на этапах проектирования и доводки / И. Е. Аннопольская, Ю. П. Антипцев, В. В. Паршин и др. // Пробл. 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 / J. Kurzke // Proc. 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.gspteam.com>.
6. Морозов, С. А. Программный комплекс ГРАД – газодинамические расчёты авиационных двигателей / С. А. Морозов // Авиакосмические технологии и оборудование: Сб. докл. науч.-практ. конф. – Казань: Казан. техн. ун-т, 2003. – С. 190–196.
7. Программный комплекс ГРАД [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://grad.kai.ru>.
8. Автоматизированная система газотермодинамических расчётов и анализа (АСТРА-4) газотурбинных двигателей и энергетических установок / А. Ю. Ткаченко, В. С. Кузьмичев, В. В. Кулагин и др. // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Матер. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Самара: Самар. аэрокосм. ун-т, 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 / Л. Н. Дружинин, Л. И. Швец // Тр. Центр. ин-та авиац. моторостроения. – 1979. – № 832. – С. 45.
10. Информационно-инструментальная система для решения задач оптимизации и идентификации при проектировании и доводке энергетических установок / А. А. Тарелин, И. Е. Аннопольская, Ю. П. Антипцев, В. В. Паршин // Вісн. нац. техн. ун-ту «ХПИ». – 2012. – № 8 – С. 17–25.
11. Синкевич, М. В. Совершенствование метода исследования и доводки газодинамических характеристик судовых ГТД на базе высокоинформативной математической модели: Дис. ... канд. техн. наук / М. В. Синкевич. – Николаев, 1988. – 214 с.
12. Чобенко, В. Н. Математическая модель одновального ГТД Д045 / В. Н. Чобенко, Р. В. Палиенко, А. Л. Лютиков // Восточ.-Европ. журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 3, № 12 (63). – С. 18–21. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/14872/12675>.
13. Жернаков, С. В. Бортовая интеллектуальная система контроля и диагностики авиационного ГТД в режиме реального времени / С. В. Жернаков, И. И. Муслухов // Актуальные проблемы в науке и технике: Сб. материалов регион. шк.-семинара аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Изд-во Уфим. авиац. техн. ун-та, 2007. – Т. 2. – С. 108–112.

Поступила в редакцию 28.08.15