

УДК 621.438-029.51

ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОВАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. Л. Лютиков

spe@mashproekt.nikolaev.ua

ГП НПКГ «Зоря»-

«Машпроект»,

54018, Украина, г. Николаев,

пр. Богоявленский, 42-А

Процессы проектирования и доводки газотурбинных двигателей (ГТД) базируются на использовании математических моделей (ММ), отражающих физическую картину процессов функционирования двигателя. Одним из путей повышения достоверности ММ является их идентификация по результатам стендовых испытаний двигателя. Идентификация ММ современных энергетических ГТД представляет собой весьма трудоемкую задачу. Это связано с необходимостью идентифицировать основные контролируемые параметры двигателя, которые определяются в ходе экспериментальных исследований и зависят от большого количества параметров, неконтролируемых в ходе эксперимента. В связи с этим актуальным направлением снижения трудоёмкости процесса идентификации ММ является применение программных комплексов идентификации. Разработанная Институтом проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного методология и средства идентификации параметров и характеристик энергетических установок по экспериментальным данным (программный комплекс Ortinit) позволяет вести направленный поиск оптимального решения на основе современных математических методов. Это, в свою очередь, приводит к сокращению времени выполнения идентификации, повышает адекватность ММ и позволяет более достоверно определять характеристики узлов двигателя. В статье предложен подход к идентификации нелинейной поузловой ММ, с детализацией расчета турбинного тракта до уровня лопаточных венцов, по результатам стендовых испытаний двигателя Д045. Описывается выбор варьируемых и контролируемых параметров, а также диапазоны их изменений. Результаты решения задачи идентификации показали возможность применения программного комплекса оптимизации и идентификации параметров и характеристик энергетических установок Ortinit при идентификации ММ ГТД Д045. Применение разработанной методологии для идентификации ММ ГТД, основанной на результатах стендовых испытаний, позволяет учитывать максимальное число варьируемых переменных и значительно снизить трудоёмкость и время этого процесса. Анализ результатов показывает, что при значительных отклонениях характеристик ГТД от проектных значений для решения задачи идентификации необходим большой объём априорной информации, на основании которой назначаются диапазоны изменения варьируемых и контролируемых параметров, а также их значения в первом приближении.

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

Введение

На сегодняшний день IT технологии внедрены во все этапы жизненного цикла газотурбинных двигателей. Одним из примеров являются математические модели ГТД, которые сопровождают двигатель от момента проектирования до его модернизации в будущем. Так, одним из этапов жизненного цикла ГТД является его доводка. Этап доводочных работ достаточно длительный и дорогостоящий. Применение ММ позволяет сократить количество натурных испытаний, заменяя их расчётными экспериментами, однако такие расчёты требуют применения адекватных ММ. Одним из путей повышения достоверности ММ является её идентификация по результатам стендовых испытаний двигателя.

Идентификация ММ современных энергетических ГТД представляет собой весьма трудоемкую задачу. Это вызвано необходимостью идентифицировать основные контролируемые параметры, которые определяются в ходе экспериментальных исследований и зависят от большого количества параметров (30–50 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 ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» доводочных работ по ГТД Д045 возникла необходимость идентификации его ММ по результатам испытаний.

© А. Л. Лютиков, 2018

В различных странах мира широкое распространение получили CAE-технологии для моделирования характеристик ГТД, которые можно разделить на две основные группы.

К первой группе относятся ММ, реализованные в таких программах, как SIMULINK / MATLAB и EcosimPro. Они не являются программными комплексами моделирования характеристик двигателя, но позволяют решать системы нелинейных уравнений, которыми и является ММ ГТД. Среди них можно выделить: Dymola (основан на языке программирования Modelica) [1], Simulink (интегрирован в среду MATLAB) [2], TRANSEO (основан на среде MATLAB) [3], PROOSIS (основан на системе EcosimPro) [4] и др., которые позволяют решать большой круг задач.

Ко второй группе относятся специализированные системы моделирования – ПК. В частности, при проектировании и доводке ГТД применяются GASTURB, GECAT, JCTS, GSP, ГРАД, АСТРА [5–9]. Эти комплексы обладают обширным функционалом: разработка статических и динамических ММ ГТД различных схем, исследование дроссельных, климатических и внешних характеристик, идентификация ММ по результатам стендовых испытаний.

Из второй группы отдельно стоит выделить программы, разработанные силами отраслевых конструкторских бюро (КБ) для использования в рамках задач этих предприятий. К ним относятся программы, разработанные и применяемые, например, в ЗМКБ «Прогресс», ОАО «НПО «Сатурн», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «Кузнецов», ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект». Они предназначены, как правило, для расчёта одной фиксированной схемы ГТД и наиболее полно учитывают особенности работы узлов в составе рассматриваемой схемы, методический и экспериментальный опыт КБ в данной области.

В ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» при расчёте статических характеристик и доводке параметров ГТД широко применяется нелинейная ММ с детализацией расчёта турбинного тракта до уровня лопаточных венцов [10]. Эта ММ подтвердила эффективность своего применения при проектировании и доводке двигателей типа М70, М80 и М90. Она разрабатывалась как универсальная – с возможностью моделирования схем ГТД с количеством каскадов компрессора до 5 и количеством ступеней турбин до 11. Первоначально модель создавалась для расчёта характеристик многовальных ГТД со свободной силовой турбиной. В процессе создания на предприятии одновальных энергетических ГТД ММ была адаптирована для расчёта параметров таких двигателей.

Дополнительно в ММ были введены:

- гидравлические потери в камере сгорания, связанные с подводом теплоты [11], что особенно актуально для одновальных ГТД, у которых при практически постоянном расходе воздуха степень подогрева в камере сгорания существенно изменяется от режима холостого хода до номинального;

- учёт приведенного зазора, что позволяет учесть отклонение реальных монтажных зазоров от проектных и их влияние на КПД турбомашин;

- влияние угла выхода потока газа из турбины на величину гидравлических потерь в газоотводящем устройстве ГТД. Это обусловлено существенным изменением угла выхода потока при изменении режима работы от холостого хода до номинального, при постоянстве частоты вращения ротора ГТД, что существенно влияет на величину потерь в газоотводящем устройстве двигателя.

Подробно структура модели описана в работе [12].

Особенностью перечисленных специализированных 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. Учитывая этот фактор, было принято решение идентифицировать ММ ГТЭ-60, разработанную и используемую ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», средствами модельно-программного комплекса многоцелевой и многоуровневой оптимизации Optimum, разработанного Институтом проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного [13].

Постановка задачи исследования

Объектом исследования являются теплотехнические характеристики энергетического ГТД Д045. Испытания ГТД Д045 проводились в составе газотурбинной электростанции ГТЭ-60 с выдачей электроэнергии в сеть.

Задача идентификации по результатам стендовых испытаний решается для поузловой нелинейной ММ ГТД Д045 с детализацией расчёта турбинного тракта до уровня лопаточных венцов [10]. Для

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

В качестве контролируемых величин выбраны наиболее важные расчетные характеристики двигателя, измерения которых произведены в процессе эксперимента. В данном случае это следующие параметры: электрическая мощность, расход воздуха на входе в двигатель, расход топливного газа, потери полного давления в воздухоприёмном устройстве, полное давление воздуха за компрессором, полная температура воздуха за компрессором, полное давление газа за турбиной и полная температура газа за турбиной (всего 8 параметров). При решении задачи идентификации были назначены несимметричные диапазоны изменений контролируемых параметров исходя из имеющейся априорной информации в пределах точности измерительного оборудования (погрешности измерений).

В качестве варьируемых параметров выбраны 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. После решения тестовой задачи к числу варьируемых переменных были добавлены температура и давление атмосферного воздуха, которые измерялись в процессе испытаний и влияли на результаты расчётов. Таким образом, число варьируемых переменных возросло до 48. Для варьируемых параметров заданы несимметричные диапазоны изменений, в зависимости от их типа (геометрические и термогазодинамические) и имеющейся априорной информации.

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. По сути решается задача многокритериальной условной оптимизации.

Порядок проведения идентификации:

Идентификация проводилась в два этапа. Первоначально задача решалась для режима максимальной мощности, при этом число контролируемых параметров составляло 8, а варьируемых 48.

Далее, учитывая, что в ММ величины потерь полного давления во входном и выходном устройствах, гидравлические потери в КС, а также величины отборов/возвратов охлаждающего воздуха являются функциями от параметров двигателя (зависят от режима его работы), то после их балансировки на режиме максимальной мощности принято решение о «заморозке» их коэффициентов моделирования при решении задачи идентификации на более низких режимах. Так же были «заморожены» геометрические параметры, не меняющиеся в зависимости от режима работы ГТД: величины горла сопловых аппаратов и рабочих колёс турбины (разницей площадей, вызванной тепловым расширением материала лопаток, пренебрегаем). При этом число варьируемых переменных сократилось до 19.

На режиме максимальной мощности (первый этап) задача идентификации в начальной точке расчета решалась в трёх постановках:

- с нулевыми отклонениями варьируемых переменных;
- с отклонениями варьируемых переменных в середине диапазона;
- с максимальными отклонениями варьируемых переменных.

После выбора удовлетворительного решения на максимально достигнутом режиме была решена серия задач вдоль линии рабочих режимов с рядом «замороженных» варьируемых переменных, описанных выше.

Решение об удовлетворительности результатов идентификации, помимо сходимости задачи с заданной точностью, принималось на основании сравнения полученных результатов с ММ, идентифицированной специалистами ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» вручную с учётом дополнительных данных, полученных во время проведения испытаний.

Результаты идентификации ММ

В настоящей статье приведены результаты идентификации ММ по данным за один из дней испытаний. Результат решения задачи идентификации для максимального режима представлен в таблице.

Результат решения задачи идентификации на режиме максимальной мощности

Контролируемый параметр	Заданное отклонение, %	Полученное отклонение, %
электрическая мощность на клеммах электрогенератора	± 1	-0,008
действительный расход воздуха через двигатель	-0,5..1 %	-0,336
расход топливного газа	$\pm 1,4$	1,481
потери полного давления в воздухоприёмном устройстве	-0,4..0 %	-0,064
полное избыточное давление воздуха за компрессором	0..0,4	0,186
полная температура воздуха за компрессором	-0,5..2 %	-0,008
полное абсолютное давление газа за турбиной	0..0,4	0,104
полная температура газа за турбиной в диффузоре ГТД	-1..+2 %	-1,008

На рис. 1–3 даны результаты идентификации для некоторых параметров в сравнении с результатами стендовых испытаний в относительных величинах.

Следует отметить, что идентификация проводилась для каждой экспериментальной точки, в которых определены соответствующие наборы коэффициентов моделирования. Таким образом, получен ряд адекватных ММ для конкретных точек дроссельной характеристики. Поэтому следующим этапом является корректировка ММ с учётом изменения коэффициентов моделирования в зависимости от режимных параметров, что даст возможность разработать адекватную математическую модель, позволяющую получать информацию во всем диапазоне рабочих режимов двигателя.

Выводы

Применение разработанной методики идентификации ММ ГТД по результатам стендовых испытаний позволяет учесть максимальное число варьируемых переменных и значительно сократить трудоёмкость и время этого процесса.

Анализ результатов показывает, что при значительных отклонениях характеристик ГТД от проектных значений для решения задачи идентификации необходимо большой объём априорной информации.

Следующим этапом является введение в структуру ММ зависимостей изменения полученных коэффициентов моделирования для создания адекватной модели, позволяющей определять параметры установки во всем диапазоне рабочих режимов двигателя.

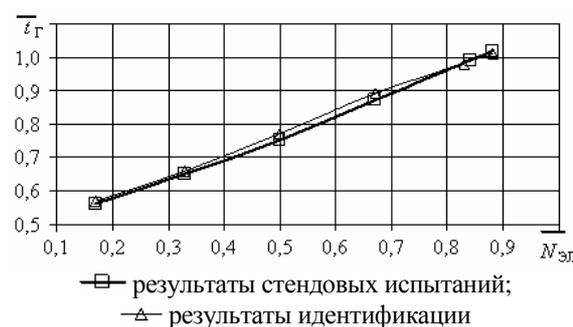


Рис. 1. Зависимость температуры газа (t_T) на выходе из ГТД от мощности на клеммах генератора ($N_{эл}$)



Рис. 2. Зависимость расхода топлива (G_T) от мощности на клеммах генератора ($N_{эл}$)

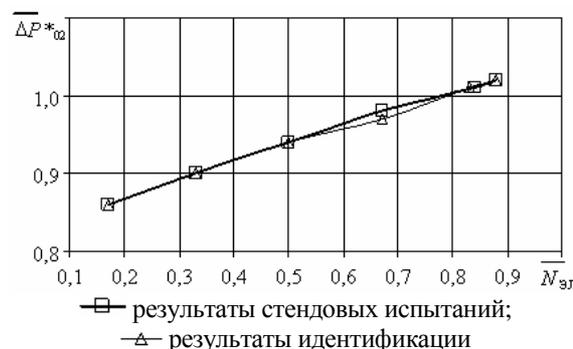


Рис. 3. Зависимость полного избыточного давления воздуха за компрессором (P^*_{02}) от мощности на клеммах генератора ($N_{эл}$)

Литература

1. Shen J., Masiulaniec K. C., Afjeh A. A. Turbojet engine simulation using dymola. *Collection of Technical Papers – AIAA/ASME/SAE/ASEE. 42nd Joint Propulsion Conf.* 2006. Vol. 6. P. 4760–4774.
2. Gomes K.J., Masiulaniec K. C., Afjeh A. A. Performance, usage, and turbofan transient simulation comparisons between three commercial simulation tools. *J. Aircraft.* 2009. Vol. 46.I.2. P. 699–704.
3. Traverso, A. TRANSEO code for the dynamic performance simulation of micro gas turbine cycles. *ASME Turbo Expo.* 2005. Vol. 5. P. 45–54.
4. Pilet J., Lecordix J., Garcia-Rosa N., Barenès R., Lavergne G. Towards a fully coupled component zooming approach in engine performance simulation. *ASME Turbo Expo: Turbine Techn. Conf. and Exposition.* 2011. Vol. 1. P. 287–299.
5. Kurzke J. GasTurb 12. Design and Off-Design Performance of Gas Turbines [Electronic resource] / Available at: <http://www.gasturb.de/manual.html>
6. GECAT [Electronic resource] / Available at: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2000-3893>
7. GSP 11 User Manual [Electronic resource] / Available at: <http://www.gspteam.com>
8. Морозов С. А. Программный комплекс ГРАД – газодинамические расчёты авиационных двигателей. *Авиакосмические технологии и оборудование: сб. докл. науч.-практ. конф.* Казань: Казан. технолог. ун-т, 2003. С. 190–196.
9. Ткаченко А. Ю., Кузьмичев В. С., Кулагин В. В., Крупенич И. Н., Рыбаков В. Н. Автоматизированная система газотермодинамических расчётов и анализа (АСТРА-4) газотурбинных двигателей и энергетических установок. *Проблемы и перспективы развития двигателестроения: матер. докл. междунар. науч.-техн. конф.* Самара: Самар. аэрокосм. ун-т, 2009. Ч. 2. С. 80–82.
10. Синкевич М. В. Совершенствование метода исследования и доводки газодинамических характеристик судовых ГТД на базе высокоинформативной математической модели: Дис. ...канд. техн. наук / Николаев. кораблестроит. ин-т. Николаев, 1988.
11. Пчёлкин Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
12. Чобенко В. Н., Палиенко Р. В., Лютиков А. Л. Математическая модель одновального ГТД Д045. *Восточ.-Европ. журн. передовых технологий.* 2013. Т. 3. № 12(63). С. 18–21.
13. Тарелин А. А., Аннопольская И. Е., Антипцев Ю. П., Паршин В. В. Информационно-инструментальная система для решения задач оптимизации и идентификации при проектировании и доводке энергетических установок. *Вісн. нац. техн. ун-ту «ХПИ».* 2012. № 8. С. 17–25.

Поступила в редакцию 19.06.2018