

УДК 621.431.75

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2014 А.Ю. Ткаченко, В.Н. Рыбаков, И.Н. Крупенич, Я.А. Остапюк, Е.П. Филинов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье описана концепция разработки виртуальной лаборатории, которая включает в себя подсистему моделирования газотурбинного двигателя (ГТД), подсистему планирования эксперимента, подсистему внесения погрешностей измерений, подсистему идентификации и др. За основу разработки виртуальной лаборатории была принята САЕ-система «АСТРА». Описаны особенности разработанной математической модели неустановившихся режимов работы газотурбинных двигателей. Основным отличием математической модели неустановившихся режимов работы ГТД от модели установившихся режимов является то, что не выполняется условие баланса мощности компрессора и турбины. На основе разработанных математических моделей разработана автоматизированная система для виртуальных испытаний газотурбинных двигателей. Разработанная система позволяет решать задачи расчёта эксплуатационных характеристик (дрессельных, скоростных, климатических и высотных), исследовать динамику переходных процессов, выбирать рациональные законы управления двигателем. Автоматизированная система для виртуальных испытаний является наглядной демонстрацией рабочего процесса и закономерностей совместной работы узлов двигателя. Описан интерфейс рабочего окна системы и приведены скриншоты основных элементов интерфейса. Разработанная система позволит сократить трудоёмкость по проведению испытаний двигателей, в процессе обучения существенно расширить количество потенциальных лабораторных работ и повысить качество подготовки специалистов.

Моделирование имитационное, модель математическая, двигатель газотурбинный, процесс переходный, интерфейс, испытания виртуальные, моделирование.

Наиболее эффективным, а часто и единственным средством изучения сложных систем является метод их моделирования. Поэтому он широко используется при разработке, проектировании и исследовании объектов и средств управления в технических системах. Метод имитационного моделирования может рассматриваться как своеобразный экспериментальный метод исследования. От обычных прямых экспериментальных методов он отличается тем, что испытанию подвергается не сам объект, а реализованная на ЭВМ его имитационная модель.

Проведение физических экспериментов по испытаниям авиационных газотурбинных двигателей – трудоёмкий и дорогостоящий процесс. Поэтому в процессе доводки и проектирования двигателей целесообразно сочетать натурные испытания ГТД с имитацией их испытаний на ЭВМ.

На кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ разработана автоматизированная система термогазоди-

намического расчёта и анализа «АСТРА» [1,2]. Термогазодинамическая модель ГТД, сформированная с помощью автоматизированной системы «АСТРА», позволяет решать задачи выбора оптимальных параметров рабочего процесса, выполнения проектного термогазодинамического расчёта, расчёта и анализа эксплуатационных характеристик, формирования исходных данных для проектирования основных узлов, а также выбора закона и программы управления ГТД.

Разработана концепция построения виртуальной лаборатории испытаний ГТД [3,4,5]. В состав виртуальной лаборатории входят следующие основные компоненты (рис. 1): подсистема математического моделирования ГТД «АСТРА»; подсистема планирования эксперимента; подсистема имитации погрешностей измерений; подсистема идентификации математической модели; подсистема документирования; подсистема визуализации процесса испытаний; информационная подсистема.

Подсистема планирования эксперимента предназначена для формирования плана проведения виртуального эксперимента.

Подсистема имитации измерений позволяет вносить в расчётные величины случайную погрешность измерения δ и отклонение параметров испытываемого двигателя от проектных значений Δ , имитирующее индивидуальные особенности каждого конкретного экземпляра двигателя, которые возникают при его изготовлении (например, погрешности изготовления лопаток, сборки ротора, камеры сгорания и т.п.). Это необходимо, например, для изучения методик обработки результатов эксперимента.

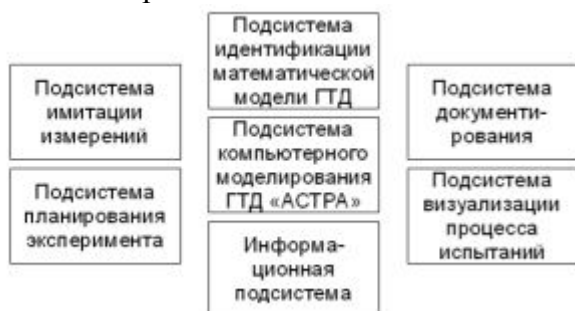


Рис. 1. Структура виртуальной лаборатории

Схема моделирования погрешности измерений и отклонений представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема моделирования погрешностей измерений и отклонений

Подсистема идентификации математической модели ГТД. В настоящее время в практике создания двигателя чаще всего используются математические модели первого уровня. Это система нелинейных уравнений, описывающая рабочий процесс и совместную работу узлов двигателя и связывающая параметры двигателя P с параметрами его узлов Q и входными воздействиями X (внешними условиями и режимом работы):

$$P = f(Q, X).$$

Идентификация такой математической модели заключается в уточнении оценок параметров узлов Q по значениям параметров двигателя P , определённым в результате испытаний. При испытаниях двигателя количество M неизвестных параметров Q намного больше, чем измеренных параметров двигателя P .

Подсистема документирования предназначена для формирования протоколов испытаний и построения характеристик двигателя.

Подсистема визуализации процесса испытаний обеспечивает мультимедийную (графическую и звуковую) имитацию испытаний - шум двигателя, имитацию движения рабочего тела по проточной части двигателя, графическое отображение измеряемых параметров и т.д.

Информационная подсистема представляет собой совокупность баз данных: база данных (БД) математических моделей ГТД; БД исходных данных; БД результатов испытаний (рис.3).



Рис. 3. Структура информационной подсистемы виртуальной лаборатории испытаний ГТД

В САЕ-системе «АСТРА» для выполнения расчёта значений параметров и их изменения в процессе работы двигателя в зависимости от различных факторов используется модуль операции численного интегрирования, позволяющий, в том числе, контролировать и изменять параметры в процессе вычисления в реальном масштабе времени. Это позволяет создавать на основе программного комплекса «АСТРА» системы имитационного моделирования ГТД различных типов и схем, которые могут решать следующие задачи:

- исследование зависимости параметров двигателя от режима работы, атмосферных и полётных условий;

- исследование динамики переходных процессов двигателя в различных условиях и её зависимости от параметров системы автоматического управления;
- выбор рациональных законов изменения управляющих факторов в процессах разгона и сброса газа;
- наглядная демонстрация рабочего процесса и закономерностей совместной работы узлов двигателя.

Основным отличием математической модели неустановившихся режимов работы ГТД от модели установившихся режимов является то, что не выполняется условие баланса мощностей компрессора N_k и турбины N_t . В этом случае разность эффективной мощности турбины и мощности компрессора определяет величину производной кинетической энергии вращающейся массы ротора:

$$N_t \cdot \eta_m - N_k = \frac{dE}{dt},$$

где η_m – КПД трансмиссии; $E = I \cdot \omega^2 / 2$ – кинетическая энергия вращающихся масс ротора; I – полярный момент инерции ротора относительно оси вращения; $\omega = \pi n / 30$ – угловая скорость.

При расчёте неустановившихся режимов значения мощностей, вырабатываемой турбиной и потребляемой компрессором при заданном расходе топлива в камере сгорания, определяются в зависимости от сочетания значений параметров цикла и частоты вращения ротора в конкретный момент времени. Их соотношение, в свою очередь, определяет величину ускорения ротора. Изменение частоты вращения ротора во времени рассчитывается путём численного интегрирования уравнения движения ротора. Значения остальных параметров двигателя определяются в квазистационарной постановке с помощью алгоритмов, используемых для расчёта установившихся режимов.

Таким образом, в термогазодинамической модели неустановившихся режимов работы ГТД используются модели основных узлов выполненного двигателя, модифицированная модель трансмиссии, модели элементов системы регулирования.

Разработанная система неустановившихся режимов работы ГТД является основой построения системы имитационного моделирования, реализации виртуальных прототипов различных испытательных стендов, которые могут быть использованы при подготовке, планировании и проведении реальных испытаний ГТД или отдельных его узлов.

За счёт задания необходимых данных при формировании математической модели двигателя возможно реализовать виртуальный аналог испытательного стенда, который может быть использован при подготовке, планировании и проведении реальных испытаний ГТД.

На основе материала, изложенного выше, с помощью автоматизированной системы «АСТРА» была сформирована термогазодинамическая модель микроГТД, которая позволяет решать задачи выбора оптимальных параметров рабочего процесса, выполнения проектного термогазодинамического расчёта, расчёта и анализа эксплуатационных характеристик, формирования исходных данных для проектирования основных узлов, а также выбора закона и программы управления микроГТД. На основе термогазодинамической модели реализован автоматизированная система для виртуальных испытаний «АСТРА 5.0.т микроГТД» в виде программного комплекса, написанного на языке объектно-ориентированного программирования Java. Главное окно системы показано на рис. 4. Программный комплекс работает на персональных компьютерах под управлением операционных сред Windows, Linux и MacOS.

В правой части панели расположены элементы, позволяющие изменять значения внешних факторов (скорости полёта, высоты полёта, отклонений температуры и давления от стандартных атмосферных условий на заданной высоте) и параметров, определяющих режим работы двигателя (частоты вращения ротора и площади выходного сечения сопла). Значения управляемых параметров могут изменяться в широких пределах с помощью «мы-

ши» или вводом конкретных значений в текстовые поля.

В средней верхней части панели представлена схема микроГТД, на которой изображены основные узлы, обозначены характерные сечения проточной части и в процессе моделирования цветом отображается изменение полной температуры рабочего тела вдоль тракта двигателя.

Под схемой расположены графики изменения полных параметров рабочего

тела и числовые значения соответствующих параметров в расчётных сечениях.

Справа сверху отображаются значения параметров двигателя в виде стрелочных и цифровых индикаторов.

Ниже индикаторов находится изображение характеристики компрессора, на которой отмечается положение рабочей точки в разные моменты времени. В этой же области отображаются графики изменения во времени выбранного параметра двигателя (рис. 5).

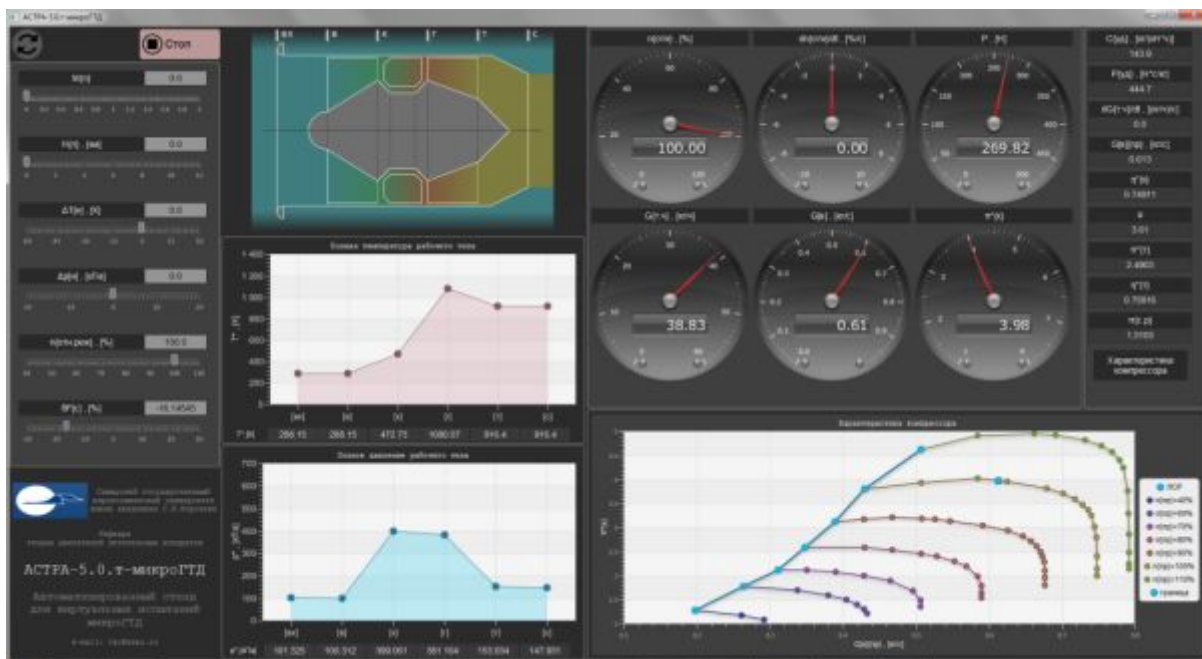


Рис. 4. Виртуальная лаборатория испытаний микроГТД

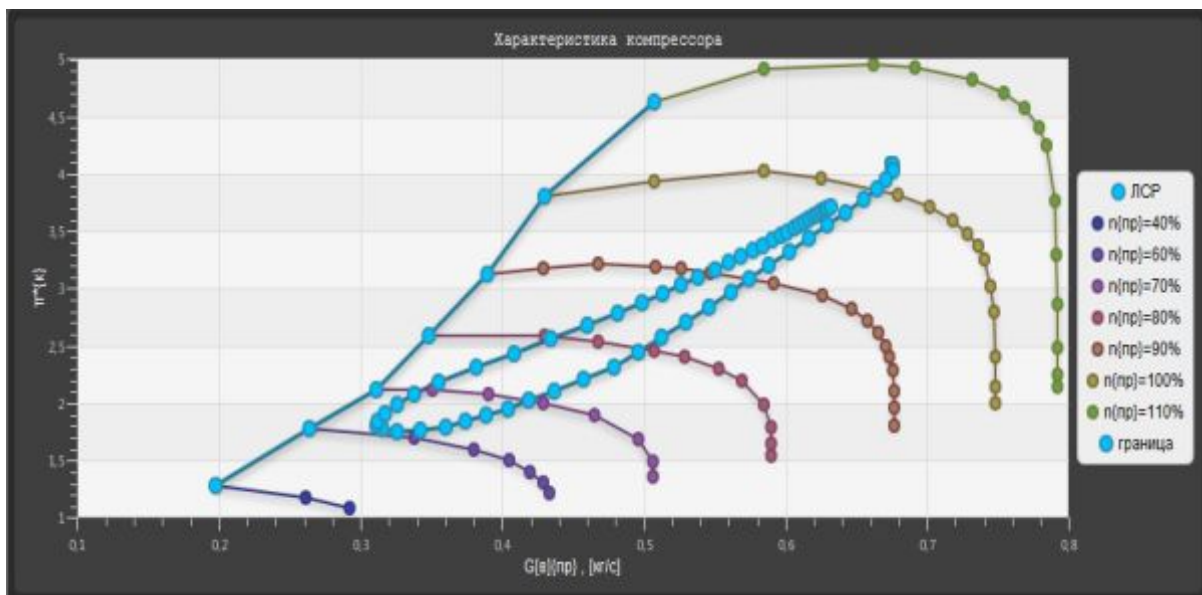


Рис. 5. Характеристика компрессора с положениями рабочих точек в различные моменты времени

При разработке авиационного двигателя одним из приоритетных направлений является создание виртуальной модели ГТД, которая охватывает весь его жизненный цикл. Из-за невозможности получения полностью адекватных моделей авиационных ГТД большая часть всех возникающих проблем решаются при помощи испытаний, которые проводятся на различных этапах жизненного цикла. Виртуальная лаборатория испытаний ГТД

предназначена для имитации испытаний двигателя по определению основных эксплуатационных характеристик двигателей (дроссельных, скоростных, высотных и климатических) и является составной частью его виртуальной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания

Библиографический список

1. Ткаченко А.Ю., Кузьмичёв В.С., Кулагин В.В., Крупенич И.Н., Рыбаков В.Н. Автоматизированная система термогазодинамического расчёта и анализа (АСТРА-4) газотурбинных двигателей и энергетических установок // Материалы докладов международной науч.-техн. конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Ч. 2. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2009. С. 80-82.

2. Ткаченко А.Ю., Крупенич И.Н. Разработка виртуального прототипа ГТД в САЕ-системе «АСТРА» на этапе концептуального термогазодинамического проектирования // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 3(34), ч. 2. С. 333-342.

3. Рыбаков В.Н., Кузьмичёв В.С., Ткаченко А.Ю. Концепция построения виртуальной лаборатории испытаний ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3(27), ч. 3. С. 326-331.

4. Рыбаков В.Н., Кузьмичёв В.С., Кулагин В.В., Крупенич И.Н., Фёдоров Д.В. Информационное обеспечение виртуальной лаборатории испытаний ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического ун-та. 2011. № 3(27), ч. 3. С. 320-325.

5. Кузьмичёв В.С., Рыбаков В.Н. Принципы и методы создания виртуальной лаборатории испытаний ГТД // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16, № 2(47). С. 199-202.

Информация об авторах

Ткаченко Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tau@ssau.ru. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, математическое моделирование, управление газотурбинными двигателями, разработка методов поиска областей наиболее выгодных параметров, численные методы оптимизации.

Рыбаков Виктор Николаевич, кандидат технических наук, ассистент ка-

федры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: viktor.rybakov@gmail.com. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, виртуальные испытания газотурбинных двигателей, математическое моделирование.

Крупенич Илья Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследо-

вательский университет). E-mail: kru@ssau.ru. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, математическое моделирование, проектирование турбокомпрессора ГТД, численные методы оптимизации.

Остапюк Ярослав Анатольевич, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail:

oya92@mail.ru. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей.

Филинов Евгений Павлович, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: filinov.evg@gmail.com. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей.

COMPUTER-AIDED SYSTEM OF VIRTUAL GAS TURBINE ENGINE TESTING

© 2014 A.Yu. Tkachenko, V.N. Rybakov, I.N. Krupenich, Ya.A. Ostapuk, E.P. Filinov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The article describes the concept of a virtual lab that includes subsystem of gas turbine engine simulation, subsystem of experiment planning, subsystem of measurement errors simulation, subsystem of simulator identification and others. The basis for virtual lab development is the computer-aided system of thermogasdynamic research and analysis "ASTRA". The features of gas turbine engine transient modes simulator are described. The principal difference between the simulators of transient and stationary modes of gas turbine engines is that the energy balance of the compressor and turbine becomes not applicable. The computer-aided system of virtual gas turbine engine testing was created using the developed transient modes simulator. This system solves the tasks of operational (throttling, speed, climatic, altitude) characteristics calculation, analysis of transient dynamics and selection of optimal control laws. Besides, the system of virtual gas turbine engine testing is a clear demonstration of gas turbine engine working process and the regularities of engine elements collaboration. The interface of the system of virtual gas turbine engine testing is described in the article and some screenshots of the interface elements are provided. The developed system of virtual gas turbine engine testing provides means for reducing the laboriousness of gas turbine engines testing. Besides, the implementation of this system in the learning process allows the diversification of lab works and therefore improve the quality of training.

Simulation, mathematical model, gas turbine engine, transient mode of operation, interface, virtual testing, modeling

References

1. Tkachenko A.Yu., Kuzmichev V.S., Kulagin V.V., Krupenich I.N., Rybakov V.N. Avtomatizirovannaya sistema termogazodinamicheskogo rascheta i analiza (ASTRA-4) gazoturbinnnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok // Materialy dokladov mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya». Part 2. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2009. P. 80-82. (In Russ.)
2. Tkachenko A.Yu., Krupenich I.N. Development of a virtual prototype of gasturbine engine at the stage of conceptual thermogasdynamic design using the CAE-system «ASTRA» // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2012. No. 3(34), part 2. P. 333-342. (In Russ.)
3. Rybakov V.N., Kuzmichev V.S., Tkachenko A.Yu. Concept of construction of virtual lab for gas turbine engine testing // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2011. No. 3(27), part 3. P. 326-331. (In Russ.)
4. Rybakov V.N., Kuzmichev V.S., Kulagin V.V., Krupenich I.N., Fedorov D.V. Dataware of virtual lab for gas turbine engine testing // Vestnik of the Samara State Aer-

ospace University. 2011. No. 3(27), part 3. P. 320-325. (In Russ.)

5. Kuzmichev V.S., Rybakov V.N. Principles and methods of gas turbine engine test-

ing virtual laboratory design // Vestnik UGATU. 2012. V. 16, no. 2(47). P. 199-202.

(In Russ.)

About the authors

Tkachenko Andrey Yurievich, Candidate of Science (Engineering), Associate professor at Department of Theory of Aircraft Engine, Samara State Aerospace University. E-mail: tau@ssau.ru. Area of Research: gas turbine engines theory, mathematical simulation, gas turbine engine controlling, design methods of field-performance data, numerical method of optimization.

Rybakov Viktor Nikolaevich, Candidate of Science (Engineering), Lecturer at Department of Theory of Aircraft Engine, Samara State Aerospace University. E-mail: viktor.rybakov@gmail.com. Area of Research: gas turbine engines theory, virtual test of gas turbine engines, mathematical simulation.

Krupenich Iliya Nikolaevich, Candidate of Science (Engineering), Associate professor at Department of Theory of Aircraft Engine, Samara State Aerospace University. E-mail: kru@ssau.ru. Area of Research: gas turbine engines theory, mathematical simulation, gas turbine engine's turbocompressor design, numbering method of optimization.

Ostapuk Yaroslav Anatol'evich, Student, Samara State Aerospace University. E-mail: oya92@mail.ru. Area of Research: gas turbine engines theory.

Filinov Evgeny Pavlovich, Student, Samara State Aerospace University. E-mail: filinov.evg@gmail.com. Area of Research: gas turbine engines theory.