

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОГРАММ УПРАВЛЕНИЯ ГТД

© 2006 В.С. Кузьмичев, В.В. Кулагин, А.Ю. Ткаченко

Самарский государственный аэрокосмический университет

Исследованы существующие методы расчета характеристик с целью выявления их достоинств и недостатков, а также определения путей их совершенствования. В предлагаемом методе расчет выполняется в последовательности, совпадающей с последовательностью течения рабочего тела в проточной части.

Как объект проектирования авиационный газотурбинный двигатель представляет собой подсистему, входящую в состав сложной системы более высокого уровня – летательного аппарата. Поэтому судить о том, насколько оптимальны выбранные параметры авиационного газотурбинного двигателя, можно только по приобретенной вследствие этого эффективности летательного аппарата.

Разработка проекта авиационного газотурбинного двигателя – это относительно небольшой по продолжительности, но чрезвычайно важный по принимаемым решениям период жизненного цикла двигателя. В результате проектирования формируются необходимые информационные модели как по двигателю в целом, так и по всем его элементам. Это, в конечном счете, предопределяет облик двигателя, особенности его конструктивного воплощения, характер технологических процессов при производстве и условия его эксплуатации.

Учитывая назначение авиационных газотурбинных двигателей, очевидно, что проектные решения должны приниматься с целью создания наиболее эффективной системы двигатель – летательный аппарат. Так как в настоящее время проектирование газотурбинного двигателя осуществляется с помощью систем автоматизированного проектирования, важной и актуальной задачей является дальнейшее совершенствование заложенных в них методов, средств и подсистем.

Одной из важнейших и актуальных задач является выбор оптимальных значений параметров рабочего процесса авиационных

ГТД. Эти вопросы всегда занимали значительное место в теории и практике проектирования ГТД. В настоящее время роль оптимизации параметров ГТД возрастает, так как, с одной стороны устанавливаются более глубокие количественные зависимости и связи между различными характеристиками и параметрами силовой установки и планера, а с другой стороны, появляется возможность формировать более обоснованные требования к системе ЛА и отыскивать оптимальные решения, используя возрастающие возможности современных ЭВМ. Решение проблемы оптимизации параметров рабочего процесса ГТД нашла отражение во многих работах [1, 5, 6].

Кроме того, одним из возможных путей повышения эффективности летательного аппарата является оптимизация программ управления его силовой установки. Но анализ опубликованных работ по оптимальному проектированию ГТД показал, что в настоящее время вопросы согласования характеристик самолета и двигателя, а также формирования оптимальных программ управления ГТД пока еще не нашли достаточно полного отражения в литературе и выполняются без детального анализа работы силовой установки и взаимодействия ее с самолетом. Поэтому актуальным направлением исследований является разработка методов и алгоритмов оптимизации программ управления ГТД по критериям эффективности летательного аппарата.

Данная задача решается на основе численного интегрирования уравнений движения летательного аппарата по заданной траектории полета [2, 4]. В свою очередь

параметры силовой установки в каждой точке траектории определяются методами расчета эксплуатационных характеристик двигателя в зависимости от режима работы, внешних и полетных условий.

При этом возникают трудности, вызванные рядом объективных факторов: сложностью математических моделей, большим количеством варьируемых параметров, сложной системой ограничений, низкой устойчивостью сходимости решения. Все эти факторы, в конечном счете, приводят к увеличению времени и трудоемкости решения задачи моделирования полета самолета и, следовательно, затрудняют оптимизацию программ управления газотурбинными двигателями.

На базе разработанной на кафедре теории двигателей Самарского государственного аэрокосмического университета автоматизированной подсистемы расчета эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей АСТРА-ВСХ, предназначенной для анализа работы газотурбинных двигателей в широком диапазоне режимов и внешних условий, были исследованы существующие методы расчета характеристик [6] с целью выявления их достоинств и недостатков, а также определения путей их совершенствования.

В настоящее время существует следующая классификация методов организации процессов вычисления характеристик газотурбинных двигателей [6]:

- метод вложенных итерационных циклов - варьируемые параметры подбираются последовательно, их значения определяются по уравнениям совместной работы узлов ГТД;
- использование формальных математических методов – варьируемые параметры определяются с помощью математических методов решения систем нелинейных уравнений, в которых на каждом шаге к решению изменяются одновременно все подбираемые параметры.

Данная классификация не вполне корректна, поскольку второй метод характеризует, строго говоря, не метод организации вычислительного процесса, а метод определения значений варьируемых параметров. Тем самым, смешиваются понятия «органи-

зация вычислительного процесса» и «метод определения значений варьируемых параметров».

Поэтому методы расчета характеристик целесообразно классифицировать как по методу организации вычислительного процесса, так и по методу определения значений варьируемых параметров (рис. 1).



Рис. 1. Предлагаемая классификация методов расчета характеристик ГТД

В соответствие с методом организации вычислительного процесса расчеты характеристик производятся:

- последовательным подбором варьируемых параметров во вложенных итерационных циклах;
- одновременным подбором варьируемых параметров в одном общем цикле.

Определение значений варьируемых параметров может осуществляться:

- с помощью формальных математических методов решения системы нелинейных уравнений или методов оптимизации;
- с использованием уравнений совместной работы узлов ГТД.

Достоинство использования формальных математических методов заключается в простоте изменения алгоритма расчета при изменении схемы двигателя и решаемой задачи. Недостаток – неустойчивость поиска решения, сложность получения результата в широком диапазоне исходных данных и условиях, далеко отстоящих от начального приближения.

Среди формальных математических методов хорошо себя зарекомендовали:

- метод Ньютона;
- метод Нелдера-Мида (метод деформируемого многогранника).

В настоящий момент в большинстве программных комплексов расчет характеристик осуществляется путем решения системы уравнений методом Ньютона. Метод обладает высокой скоростью сходимости, универсальностью и широко применяется на практике. Но использование метода Ньютона не всегда обеспечивает достаточную надежность сходимости решения. Она может отсутствовать при плохой обусловленности Якобиана, который сильно зависит от параметров начального приближения. Вследствие этого метод Ньютона целесообразно использовать совместно с другими методами.

Большой интерес представляет метод Нелдера-Мида (метод деформируемого многогранника). Он является методом нулевого порядка, оперирует только значениями целевой функции и не требует расчета частных производных. Кроме того, он менее чувствителен к начальному приближению и форме поверхности отклика. На основе проведенных численных экспериментов установлено, что при количестве варьируемых переменных более 7-10 данный метод становится экономичнее метода Ньютона.

Вторая категория методов определения значений варьируемых параметров – определение значений варьируемых параметров по уравнениям совместной работы узлов ГТД - был реализован в подсистеме расчета характеристик АСТРА-ВСХ. Тестирование показало высокую устойчивость поиска решения. Недостатком является сложность использования этих методов в универсальных математических моделях ГТД, поскольку пересчет варьируемых параметров по уравнениям совместной работы узлов осуществляется во вложенных циклах.

Проведенный анализ показал, что для повышения эффективности и надежности работы следует использовать модифицированные методы расчета характеристик, такие, например, как:

- расчет с помощью вложенных итерационных циклов и определением значений варьируемых параметров формальными математическими методами;
- определение значений варьируемых параметров по уравнениям совместной ра-

боты узлов ГТД с одновременным их изменением на каждом шаге итераций.

Последний вариант является наиболее перспективным, поскольку обладает как устойчивостью поиска решения, так и быстродействием.

Но, поскольку не все варьируемые параметры возможно вычислять по уравнениям совместной работы узлов, например, параметры режима, то предлагается выполнять расчет в двух вложенных циклах (рис. 2):

- внутренний цикл - определение положения рабочей точки (поиск значений варьируемых параметров: G_{Σ} , m , π_T^*), при заданных значениях параметров режима, с помощью метода, основного на закономерностях совместной работы узлов ГТД;
- внешний цикл - определение значений параметров режима, удовлетворяющих заданному закону или программе управления с помощью формальных математических методов.

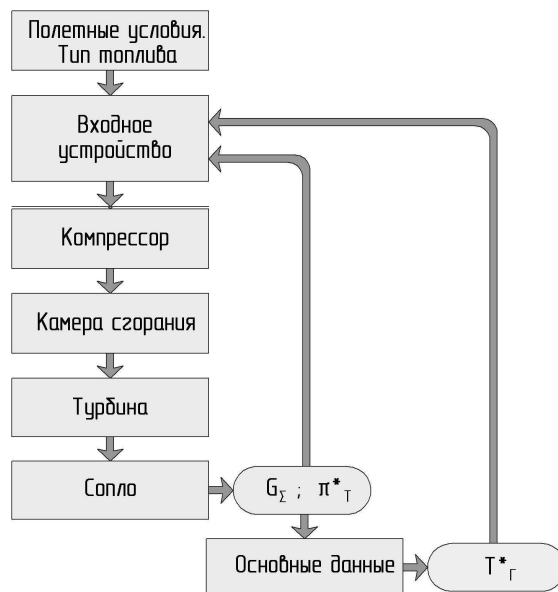


Рис. 2. Схема предлагаемого метода расчета характеристик на примере ТРД

В предлагаемом методе расчет выполняется в последовательности, совпадающей с последовательностью течения рабочего тела в проточной части. В качестве варьируемых параметров выбираются степени понижения давления в турбинах $\pi_{ТВД}^*$, $\pi_{ТСД}^*$, $\pi_{ТНД}^*$, которые в основном диапазоне рабо-

чих режимов изменяются несущественно [3]. Данный подход позволяет надежно решать задачу подбора значений варьируемых параметров и значительно уменьшить количество последовательных приближений. При этом параметры компрессоров определяются на основании уравнения баланса мощности.

Кроме того, в качестве варьируемых параметров выбираются расход воздуха через двигатель G_{Σ} и степень двухконтурности m (для двухконтурных двигателей), а в качестве параметров режима – температура перед турбиной $T_{Г}^*$, температура в форсажной камере $T_{Ф}^*$, площадь критического сечения регулируемого сопла $F_{С.КР}$, коэффициент отбора мощности от турбины на привод винта $\eta_{ПОТР}$ (для ТВД).

Значения варьируемых параметров определяются из условия обеспечения заданных площадей характерных сечений. Значения параметров режима подбираются из условия обеспечения заданных значений параметров регулирования [3].

Кроме того, предлагается дополнить алгоритм расчета характеристик блоком формирования начальных приближений варьируемых параметров, из условия подбора режимов работы двигателя.

Апробация предложенных методов и алгоритмов в подсистеме АСТРА-ВСХ показала возможность оптимизации программ управления ГТД по критериям эффективности летательного аппарата, благодаря сокращению суммарного времени и трудоемкости расчета характеристик газотурбинного двигателя.

Список литературы

1. Авиационные турбореактивные двигатели с изменяемым рабочим процессом для многорежимных самолетов / Ю.Н. Нечаев, В.Н. Кобельков, А.С. Полев – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.: ил.
2. Аэромеханика самолета: Динамика полета: Учебник для авиационных вузов/ А.Ф. Бочкарев, В.В. Андреевский, В.М. Белоконов др.; Под ред. А.Ф. Бочкарева и В.В. Андреевского. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с., ил.
3. Кулагин В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. Основы теории ГТД. Кн.1. Рабочий процесс и термодинамический анализ. Кн.2. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. – М.: Машиностроение, 2002. – 616 с.
4. Основы интеграции самолета и двигателя / Под общ. Ред. О.К. Югова. - М.: «Машиностроение», 1989. – 304 с.
5. Теория и методы начальных этапов проектирования авиационных ГТД / В.Г. Маслов, В.С. Кузьмичев, А.Н. Коварцев, В.А. Григорьев.- Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1998.- 147 с.
6. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Учебник. Кн. 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД/ С.К. Бочкарев, И.М. Горюнов, В.С. Кузьмичев и др. Под общ. ред. В.В. Кулагина. М.: Машиностроение, 2005. 464 с.

PERFECTION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS CALCULATION TECHNIQUES FOR THE DECISION OF TASK OF GAS TURBINE ENGINE CONTROL PROGRAM OPTIMIZATION

© 2006 V.S. Kuzmichev, V. V. Kulagin, A. Yu. Tkachenko

Samara State Aerospace University

The article describes methods of perfection of operational characteristics calculation techniques for the decision of task of gas turbine engine control program optimization