

## МЕТОДОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВИАЦИОННЫХ ГТД

© 2006 Д.А. Ахмедзянов, Е.С. Власова, А.Е. Кишалов

Уфимский государственный авиационный технический университет

Предложен метод моделирования различных неустановившихся режимов работы ГТД произвольных схем, реализованный в системе имитационного моделирования работы авиационных ГТД в термогазодинамическом аспекте совместно с элементами управления и контроля – DVIGwp.

В своем развитии современные авиационные газотурбинные двигатели и энергетические установки на их базе (далее ГТД) достигли высокой степени сложности, а требования к эффективности процесса их разработки все более ужесточаются. В настоящее время, в связи с созданием авиационных ГТД новых поколений, а также с повышением требований к эффективности процессов проектирования двигателей и энергоустановок больше внимания уделяется методам и средствам моделирования ГТД и его узлов. Создание авиационных ГТД новых поколений, проведение работ, направленных на повышение основных термогазодинамических показателей, требуют применения новой методологии и средств проектирования.

Использование информационных технологий в существенной мере определяет успешность создания авиационных двигателей новых поколений. Любая сложная техническая система в своем развитии неизбежно достигает этапа, когда эффективная организация ее жизненного цикла (ЖЦ) в целом и, прежде всего, на стадии разработки требует использования системного подхода, динамического формирования имитационной модели для структурной и параметрической оптимизации. В связи с этим технологии автоматизированного проектирования, компьютерного анализа (САЕ), конструирования (САД) и изготовления (САМ) изделий играют все большую роль.

Современный газотурбинный двигатель представляет собой сложную динамическую систему с взаимосвязанным влиянием газодинамических и теплофизических процессов, протекающих в его узлах. Функционирование двигателя происходит при постоянном действии внутренних и внешних возмущений, а для маневренных самолетов – практически на неустановившихся режимах. К неустановившимся про-

цессам в двигателе относятся процессы при переходе с одного установившегося режима на другой: запуск двигателя с выходом на режим малого газа или другой заданный режим, приемистость (переход с пониженного на максимальный или полный форсированный режим), дросселирование (переход с максимального на пониженный режим), встречная приемистость (процесс увеличения режима сразу после уменьшения – комбинация дросселирования и приемистости), включение и выключение форсированного режима, изменение режимов в связи с изменением положения органов управления (положения регулируемого сопла, направляющих аппаратов компрессора, турбины, клапанов перепуска воздуха в тракте и т.д.), изменение нагрузки на силовой турбине и др.

Математическая модель, давая возможность более обоснованно анализировать условия работы двигателя в системе силовой установки летательного аппарата, повышает информативность теоретических и экспериментальных исследований, позволяет обеспечить большой экономический эффект на всех этапах ЖЦ двигателя. Имитационное моделирование — метод исследования, основанный на том, что изучаемая динамическая система заменяется ее имитатором и с ним проводятся эксперименты с целью получения информации об изучаемой системе. Таким образом, имитационные модели ГТД могут использоваться для проектирования, анализа и оценки их функционирования [1]. Процесс последовательной разработки имитационной модели начинается с создания простой модели, которая затем постепенно усложняется в соответствии с требованиями, предъявляемыми решаемой проблемой.

В процессе создания имитационной модели можно выделить следующие основные этапы:

– формулирование проблемы: описание исследуемой проблемы и определение целей

исследования;

- разработка модели: логико-математическое описание моделируемой системы в соответствии с формулировкой проблемы;
- подготовка данных: идентификация, спецификация и сбор данных;
- трансляция модели: перевод модели на язык, приемлемый для используемой ЭВМ;
- верификация: установление правильности машинных программ;
- валидация: оценка соответствий требуемой точности имитационной модели реальной системе;
- стратегическое и тактическое планирование: определение условий проведения машинного эксперимента с имитационной моделью;
- экспериментирование: прогон имитационной модели на ЭВМ для получения требуемой информации;
- анализ результатов: изучение результатов имитационного эксперимента для подготовки выводов и рекомендаций по решению проблемы;
- реализация и документирование: реализация рекомендаций, полученных на основе имитации, и составление документации по модели и ее использованию.

Суть предложенного универсального метода моделирования различных неустановившихся режимов работы ГТД произвольных схем базируется на следующих принципах:

1) объектного подхода и модульного принципа построения модели: на экране составляется топологическая схема моделируемого двигателя (установки) из модулей (входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина, реактивное сопло, отбор воздуха, потребитель мощности и т.д.), а также элементов системы регулирования (регуляторы, датчики и т.д.);

2) описания предметной области на единых универсальных исходных принципах, заключающихся в выделении основных типов информационных потоков данных (газодинамического, механического, топливного), в задании входных и получении выходных индивидуальных данных и характеристик модуля;

3) универсального подхода к моделированию различных неустановившихся режимов, заключающегося в возможности моделирования для скомпонованной схемы двигателя любых неустановившихся режимов - запуска, приемистости, дросселирования, встреч-

ной приемистости, включения и выключения форсированного режима, изменения режимов в связи с изменением положения органов управления, изменения нагрузки на силовой турбине и др.

4) универсальности задания законов расчета (программ регулирования двигателя): для любой задачи устанавливаются функции цели - так называемые поддерживаемые параметры или комплексы, в частности, являющиеся параметрами (законами) регулирования, и варьируемые величины (константы или элементы характеристик узлов двигателя), за счет вариации которых достигается выполнение функции цели. Таким образом, в зависимости от решаемых задач - идентификации, “завязки” и моделируемых режимов работы ГТД - составляются соответствующие законы расчетов (программы регулирования), которые реализуются с помощью встроенного “решателя”.

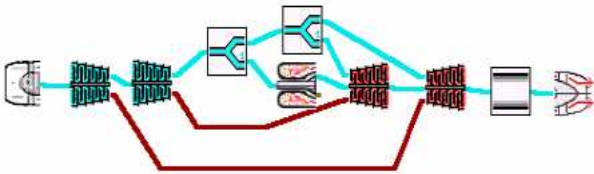
5) решения уравнений: решение систем обычных и дифференциальных уравнений, описывающих неустановившиеся режимы работы авиационных ГТД с помощью методов Ньютона и Эйлера (или Рунге-Кутты).

6) открытость метода: метод позволяет легко вносить изменения и дополнения, связанные с необходимостью учета или уточнения новых динамических факторов, изменения алгоритмов расчета отдельных узлов двигателя или элементов управления в зависимости от схемы двигателя, от условий и режимов работы, от требований, предъявляемых к динамике двигателя на различных неустановившихся режимах, от особенностей рабочих процессов конкретных ГТД.

Предложенный метод реализован в системе имитационного моделирования работы авиационных ГТД в термогазодинамическом аспекте на неустановившихся режимах совместно с элементами управления и контроля – DVIGwr [5].

Процесс моделирования различных неустановившихся режимов работы ГТД в разработанной системе DVIGwr происходит в несколько этапов в соответствии с описанными выше принципами.

На рис. 1 – 4 показаны примеры задания законов расчета (программ регулирования) неустановившихся режимов в системе DVIGwr для ГТД различных схем. На рис. 1 показан закон расчета процесса приемистости (сброса) для двухвальной схемы – задается расход топлива  $G_T$  как функция времени.

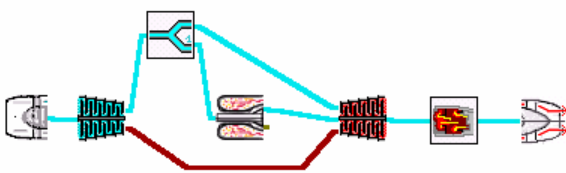


Варьируются	Поддерживаются
$T_r^*$ (КС)	$G_T$ (КС)
$\pi_k^*$ (КВД)	$A_T$ (ТНД)
$\pi_k^*$ (КНД)	$A_T$ (ТВД)
$G_B$ (ВУ)	$F_{скр}$ (РС)

Рис. 1. Схема двухвального двигателя P95 и закон расчета приемистости (сброса) в системе DVIGwr

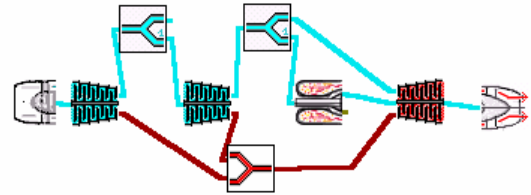
На рис. 2 показан закон расчета процесса включения (выключения) форсажа в одновальном двигателе, при этом качество процесса обеспечивается согласованием подачи топлива в форсажную камеру ( $G_{T\phi}$ ) и раскрытием сопла (изменением площади  $F_{скр}$ ). На рис. 3 показан закон расчета открытия (закрытия) ленты перепуска – согласование режимов работы передней (до перепуска) и задней (после перепуска) частей компрессора обеспечивается заданием положения ленты перепуска воздуха ( $V_{лп}$ ) и поддержанием равенства частот вращения передних и задних частей.

На рис. 4 показан закон расчета для изменения нагрузки на силовой турбине установки, при этом регулятор частоты вращения расположен на валу силовой турбины и поддерживает допустимое отклонение частоты вращения за счет изменения расхода топлива ( $G_T$ ) при переменной мощности генератора ( $N_{ген}$ ).



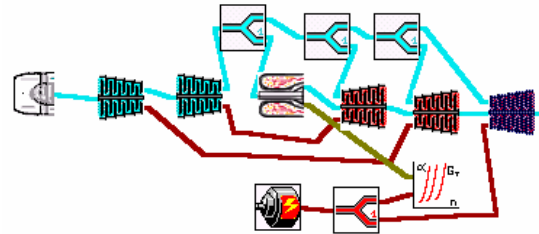
Варьируются	Поддерживаются
$T_r^*$ (КС)	$G_T$ (КС)
$\pi_k^*$ (КОМ)	$A_T$ (ТУР)
$T_\phi^*$ (ФК)	$G_{T\phi}$ (ФК)
$G_B$ (ВУ)	$F_{скр}$ (РС)

Рис. 2. Схема одновального двигателя PD-9F с форсажной камерой сгорания и закон включения (выключения форсажа) в системе DVIGwr



Варьируются	Поддерживаются
$T_r^*$ (КС)	$G_T$ (КС)
$V_{вх}$ (ЛП)	$V_{вых}$ (ЛП)
$\pi_k^*$ (КВД)	$n$ (КВД)
$\pi_k^*$ (КНД)	$A_T$ (ТУР)
$G_B$ (ВУ)	$F_{скр}$ (РС)

Рис. 3. Схема одновального двигателя KP7-300 с лентой перепуска и закон открытия (закрытия) ленты перепуска в системе DVIGwr



Варьируются	Поддерживаются
$T_r$ (КС)	$A_T$ (ТВД)
$\pi_k^*$ (КВД)	$A_T$ (ТНД)
$\pi_k^*$ (КНД)	$A_T$ (СТ)
$G_B$ (ВУ)	$p_2$ (СТ)
$N_{вх}$ (ГЕН)	$N_{вых}$ (ГЕН)
$\dot{n}$ (ГЕН)	$K_G$ (РЕГ)

Рис. 4. Схема GTU 10/95 с регулятором  $n_{СТ} = const$  и закон изменения нагрузки на силовой турбине в системе DVIGwr

Реализованный в системе DVIGwr модульный принцип учета динамических факторов [3] обеспечивает универсальное построение, развитие и детализацию алгоритмов расчета неустановившихся режимов работы авиационных ГТД произвольных схем. Такой принцип (в теории систем - принцип независимости) позволяет универсально производить введение в модель тех или иных факторов по мере необходимости с учетом решаемых задач. Структурная схема алгоритма учета любого из факторов независимо от конкретного узла двигателя универсальна – динамический блок включает в себя: задание начальных условий; вычисление дифференциалов и производных; расчет конкретных динамических добавок. При за-

дании признака учета того или иного фактора динамический блок производит уточнение уравнений энергии и неразрывности, при этом стационарный алгоритм модуля не изменяется. В случае не учета динамических добавок динамический блок выполняет роль передатчика информации без изменений.

Таким образом, разработана методология имитационного моделирования работы авиационных ГТД на неустановившихся режимах, позволяющая получать динамические характеристики ГТД уже на стадии проектирования для проведения целенаправленного поиска технических проектных решений, обеспечивающих предельные значения показателей эффективности разрабатываемых авиационных двигателей.

Усложнение задач управления, использование более совершенных и сложных алгоритмов управления, развитие электронных технологий создали предпосылки широкого внедрения методов математического моделирования для задач оптимального управления двигателем. Адекватность математического описания термогазодинамических процессов на этапах проектирования ГТД предопределяет затраты, связанные с обеспечением требуемых характеристик изделия, позволяет оптимизировать параметры рабочего процесса и сократить время создания двигателя.

#### Список литературы

1. Сосунов В.А. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энер-

гетических установок / В.А. Сосунов, В.М. Чепкин. М.: МАИ, 2003. – 688 с.

2. Добрянский, Г.В. Динамика авиационных ГТД / Г.В. Добрянский, Т.С. Мартынова. М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.

3. Ахмедзянов, Д.А. Модульный принцип учета влияния динамических факторов на характеристики неустановившихся процессов ГТД в компьютерной среде DVIG / Д.А. Ахмедзянов, И.А. Кривошеев // Изв. вузов, сер. “Авиационная техника”. - 1999. - №2. - С. 27-30.

4. Кривошеев, И.А. Моделирование динамических процессов в сложных системах / И.А. Кривошеев, Д.А. Ахмедзянов. Уфа: Изд. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та, 2003. - 99 с.

5. Ахмедзянов, Д.А. Система термогазодинамического моделирования газотурбинных двигателей на переходных режимах работы DVIGwp / Д.А. Ахмедзянов, И.А. Кривошеев, Е.С. Власова: Свидетельство об официальной регистрации № 2004610868. Москва: Роспатент, 2004.

6. Ахмедзянов, Д.А. Влияние тепловой нестационарности на динамические характеристики авиационных ГТД / Д.А. Ахмедзянов, Е.С. Власова // Полёт (авиация, ракетная техника и космонавтика). - Москва. - 2006. - №2. - С. 34-39.

7. Тунаков, А.П. САПР авиационных ГТД / А.П. Тунаков, И.А. Кривошеев, Д.А. Ахмедзянов. Уфа: Изд. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. – Уфа, 2005. – 272 с.

## SIMULATION TECHNOLOGY OF NOT PUT IN ORDER CONDITIONS OF AVIATION GTE

© 2006 D.A. Achmedzjanov, E.S. Vlasova, A.E. Kishalov

USATU

The method of various unsteady operating modes modeling of any GTD schemes, realized in system of imitating modeling of aviation GTD work in termogasdynamic aspect together with management and the control elements - DVIGwp is offered.