

УДК 681.5

Д.И. ВОЛКОВ<sup>1</sup>, В.М. ГРУДИНКИН<sup>1</sup>, В.А. КАЧУРА<sup>2</sup>, А.А. РАЗЛАДСКИЙ<sup>3</sup><sup>1</sup>ОАО «Элемент», Одесса, Украина<sup>2</sup>ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина<sup>3</sup>ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

## СТЕНДЫ-ИМИТАТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Выполнен анализ существующих аппаратных и программных решений в области построения стендов-имитаторов, а также их применение на стадиях разработки и отладки, опытной эксплуатации, серийного производства и эксплуатации систем управления газотурбинных двигателей. Рассмотрены подходы к разработке и отладке алгоритмов контроля с применением стендов-имитаторов, построенных на базе индивидуальной квазилинейной динамической модели. Также затронуты вопросы использования стендов-имитаторов в смежных областях проектирования и испытания авиационных двигателей. Показана роль стендов-имитаторов в повышении с одной стороны экономической эффективности производства, а с другой стороны надёжности производимых систем управления и газотурбинных двигателей.

**стенд-имитатор, система автоматического управления, индивидуальная математическая модель, алгоритмы контроля и управления**

### Введение

За последние десятилетия стенды-имитаторы в ходе их эволюционного развития превратились в интегральный инструмент для отладки, тестирования и сертификации электронных систем управления (САУ) газотурбинных двигателей (ГТД).

Первоначально стенды-имитаторы разрабатывались исключительно как инструмент для тестирования аппаратных интерфейсов и простых алгоритмов. В настоящее время это автоматизированное средство, призванное значительно снизить время, затрачиваемое на тестирование, а также повысить его качество. Кроме того, стенд-имитатор обеспечивает проведение практически полного перечня испытаний САУ, что в значительной мере сокращает требуемое время и соответственно финансовые затраты на стендовые и лётные испытания.

Имитируемый при помощи стенда-имитатора ГТД, который выдаёт и принимает те же физические сигналы, что и реальный двигатель, является оптимальным решением для интегральной верификации программного обеспечения и технических средств.

При этом значительно повышается надёжность, снижается затрачиваемое на отладку и тестирование время, а также обеспечивается обнаружение неправильного функционирования. Кроме того, такое решение позволяет выполнять автоматизированную оптимизацию контуров управления с учётом как модели ГТД, так и датчиков, преобразователей и исполнительных механизмов.

Одной из важных составляющих современного стенда-имитатора является математическая модель ГТД, который представляет собой сложную совокупность разнообразных компонентов, которые разрабатываются в соответствии с аэротермодинамическими законами. Сложность аэротермодинамического анализа делает практически невозможным как аналитическую идентификацию математической модели ГТД, так и её использование в задачах оптимального синтеза и анализа САУ ГТД. Кроме того, такой подход не учитывает отличий индивидуальных характеристик ГТД, возникающих как в процессе производства, так и в процессе выработки ресурса [1, 6].

## 1. Формулирование проблемы

Рассмотрим иерархическую структуру САУ ГТД в составе двигательной установки (рис. 1).

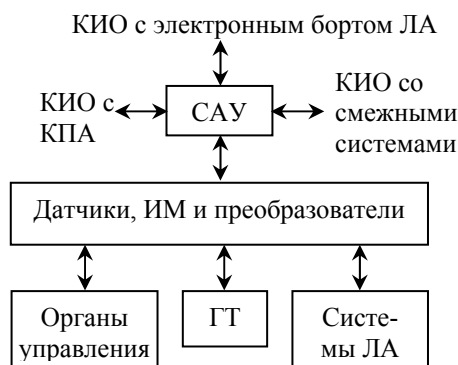


Рис. 1. Иерархическая структура САУ ГТД в составе двигательной установки

САУ выполняет контроль параметров работы ГТД, систем летательного аппарата (ЛА) и органов управления, взаимодействует по КИО с различными системами, в том числе с электронным бортом ЛА. Кроме того, предусматривается контрольно-проверочная аппаратура (КПА) для настройки САУ в эксплуатации.

Одной из характерных особенностей современных САУ, отвечающих в большинстве своём требованиям FADEC, является её гетерогенность. САУ может объединять разнообразные по физической природе и принципу действия датчики, преобразователи и исполнительные механизмы, которые могут быть как аналоговыми, так и цифровыми (smart). При этом цифровые могут использовать широкий спектр протоколов информационного обмена, начиная с классических ARINC-429 и MIL-STD и заканчивая применяемыми главным образом в технологических и диагностических системах CAN, TTP, RS-232, RS-485 и FireWire. Управляющие механизмы нередко работают в контуре управления, являющемся вспомогательным по отношению к САУ ГТД. Один из ярких примеров – контур управления расходом топлива на базе насоса-дозатора. В последнее время наметились тенденции к организации взаимодействия САУ ГТД и таких исполнительных

механизмов с использованием цифровых КИО.

Аналогичная ситуация с КИО смежных систем, электронного борта ЛА и КПА. Здесь стоит отметить, что в составе смежных систем нередко присутствует САУ соседнего ГТД. При этом кроме чисто информационного взаимодействия САУ соседних двигателей нередко решают задачу совместного управления общим параметром, например, при синхронизации мощностей на валу или фаз вращения винтов.

Жизненный цикл САУ предполагает выполнение следующих работ:

- научно-исследовательских (НИР);
- опытно-конструкторских (ОКР);
- создания экспериментальных образцов;
- серийного производства;
- эксплуатации.

Здесь стоит отметить, что современная САУ типа FADEC состоит из программного и аппаратного обеспечения. Соответственно, перечисленные этапы разработки предполагаются для обоих видов обеспечения и, учитывая мировую интеграцию, процессы на этих этапах должны соответствовать требованиям RTCA/DO-178 и RTCA/DO-254 или аналогичным стандартам EUROCAE.

Также отметим, что стадии НИР и ОКР нередко совпадают во времени для ГТД и САУ.

Итак, задачей имитационного моделирования и соответственно стендов-имитаторов, как программно-аппаратного средства, является обеспечение процессов на всех стадиях жизненного цикла САУ.

## 2. Решение проблемы

Рассмотрим обеспечение процессов для каждой стадии жизненного цикла САУ.

На этапе НИР формируется научный базис для последующего проектирования. Выполняется, как правило, идентификация в первом приближении математической модели ГТД и других составляющих двигательной установки, исследуются вопросы

управления ГТД. Однако уже на этом этапе нередко начинается разработка ПО для моделирования работы ГТД и его САУ, фрагменты которого закладываются в основу ПО САУ и стенда-имитатора.

На этапе ОКР кроме непосредственно проектирования САУ выполняется проектирование всевозможных стендов-имитаторов, которые классифицируются с одной стороны по решаемой задаче (обеспечение решения в САУ задач измерения, информационного взаимодействия, управления и т.д.) и с другой стороны по имитируемому объекту (ГТД, датчики, преобразователи, ИМ, смежные электронные системы и т.д.).

Одним из основных как по решаемым задачам, так и по сложности реализации, является стенд-имитатор ГТД. Современный стенд-имитатор с одной стороны отвечает многим требованиям к системам реального времени, а с другой стороны в силу экономических соображений должен быть универсальным и иметь модульную наращиваемую структуру, как в отношении технических средств, так и в отношении ПО.

Опираясь на указанные требования, специалистами ОАО «Элемент» при тесном сотрудничестве с ГП ЗМКБ «Прогресс», ОАО «Мотор Сич» и НАУ «ХАИ», был разработан универсальный стенд-имитатор, который обеспечивает имитацию работы ряда авиационных двигателей, таких как АИ-22, АИ-450 и Д-436 (рис. 2).

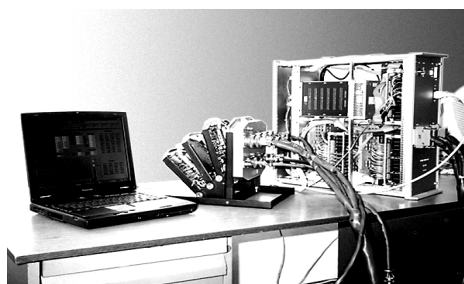


Рис. 2. Стенд-имитатор ГТД АИ-450

Данный стенд-имитатор был разработан на базе одноплатного промышленного контроллера, а также модулей имитации датчиков, измерительных преобразователей и исполнительных механизмов.

Для обеспечения реального времени при имитации работы ГТД стенд-имитатор должен работать под управлением ОС реального времени, а также MsDOS, которая по современной классификации не относится к системам реального времени, в частности из-за его однозадачности. Тем не менее, данная ОС даже на сегодняшний момент успешно используется во встраиваемых (embedded) системах, в том числе реального времени.

В настоящее время ОАО «Элемент» в значительной мере базируется в своих разработках на применении сетевой ОС реального времени QNX. Микроядро, сетевая архитектура, тенденции к открытости принципов работы и исходных кодов делает эту операционную систему весьма привлекательной. Из области практического применения данной ОС в изделиях ОАО «Элемент» стоит отметить программно-технические комплексы испытания авиационных двигателей [4, 5], испытательные полигоны и стенды-имитаторы.

Итак, на одноплатном компьютере выполняется моделирование работы двигателя, взаимодействие с имитаторами, а также информационный обмен с технологическим компьютером (рис. 3).

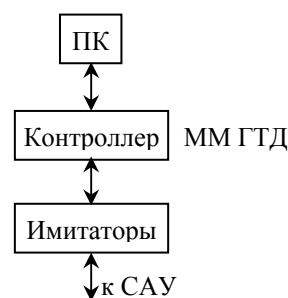


Рис. 3. Структурная схема стенда-имитатора ГТД

Моделирование в реальном времени ГТД налагает некоторые ограничения на математическую модель (ММ) ГТД. Поэтому применяются быстросчётные квазилинейные динамические модели (КЛДМ), которые обеспечивают требуемую точность моделирования на установившихся и переходных режимах. Для учёта отличий в индивидуальных характеристиках двигателя, возникающих как при произ-

водстве, так и при выработке ресурса двигателя, в КЛДМ применяются коэффициенты влияния [1, 6]. Такой подход в значительной мере одновременно упрощает идентификацию индивидуальной модели на базе типовой и её настройку в стенде-имитаторе. Индивидуализация математической модели таким образом сводится к идентификации значений коэффициентов влияния и их изменения при помощи программного редактора в стенде-имитаторе.

Имитация работы авиационных датчиков также заслуживает пристального внимания. Особые условия эксплуатации в составе двигательной установки обусловили применение в авиации ряда специфических датчиков измерения частоты, углового положения и т.д.

Например, при имитации авиационных датчиков частоты, например, типа ДТА, необходимо имитировать различный уровень амплитуды как функции частоты и обеспечивать «гладкое» переключение частоты (без сдвига фазы) в динамике. Так несоблюдение последнего требования приведёт к невозможности отладки контура управления ускорением на приемистости.

Имитация датчиков углового положения типа ДБСКТ и ЛВТ также непростая задача. Согласно ТУ частота переменного напряжения питающего сигнала для данных датчиков составляет 2000 Гц. Для многих задач данная частота является более чем достаточной для обеспечения достаточной точности в динамике. Однако при необходимости управления угловым положением направляющих аппаратов или дозирующей иглы насоса-дозатора измерение угла выполняется на интервале нескольких периодов. Поэтому в этом случае к динамическим параметрам имитаторов предъявляются также достаточно жёсткие требования.

Отдельным вопросом является имитация стендом-имитатором отказных ситуаций (короткое замыкание, обрыв) в датчиках, в том числе для проверки встроеной системы контроля (ВСК) САУ.

При этом, учитывая возможные межканальные связи (не только санкционированные, но и возникшие в результате дефекта) требуется выполнение там, где это необходимо, проверок при различных вариантах короткого замыкания (например, проводов датчика между собой или провода на «землю») и обрывов (индивидуально для каждого провода).

Следующий уровень взаимодействия САУ ГТД – взаимодействие по КИО со смежными системами, электронным бортом ЛА и КПА.

Для имитации смежных самолётных и двигательных систем в условиях стендовых испытаний разрабатываются специальные имитаторы, которые в простом случае представляют собой автоматизированное средство для имитации КИО этих систем. Примером такого имитатора служит Стендовый имитатор агрегатов самолета и двигателя (СИАСИД-148-01), который является компонентом ПТК. Применение имитаторов, во-первых, в значительной мере, сокращает стоимость стендового оборудования по сравнению с вариантом использования реальных самолётных и двигательных систем. Во-вторых, имитаторы позволяют выполнять проверки поведения САУ во всём диапазоне изменения параметров, передаваемых в САУ по КИО, включая отказные ситуации. Поэтому такие имитаторы в настоящее время пользуются спросом и практически стали неотъемлемой частью программно-технических комплексов испытания ГТД, выпускаемых ОАО «Элемент».

Следующий по сложности это имитатор соседнего двигателя. Так, например, ОАО «Элемент» для отладки и проверки контура синхронизации мощностей на валах свободных турбин ГТД АИ-450, совместно работающих на несущий винт, был разработан имитатор второго двигателя [2]. Устройство выполняет имитацию также посредством КИО, но при этом выполняет в реальном времени моделирование работы ГТД под управлением САУ, а также работы несущего винта.

На этапе изготовления действующего макета САУ имитатор второго двигателя взаимодействовал со стендом-имитатором ГТД, а именно вычислял крутящий момент на валу свободной турбины и задал его в стенде-имитаторе. САУ измеряла значение крутящего момента на валу свободной турбины своего двигателя, имитируемого стендом-имитатором, и по КИО от имитатора второго двигателя получала значение крутящего момента на валу свободной турбины соседнего ГТД.

На этапе испытаний на двигательном стенде место стенда-имитатора занимает система управления гидротормозом. Принцип использования имитатора второго двигателя остаётся тот же.

На стадии эксплуатации широкое применение находят имитаторы, всевозможные тестеры, измерители специальных параметров и КПА промышленного исполнения.

КПА является важным инструментом для наладки САУ, так как обеспечивает контроль и регистрацию рабочих и диагностических параметров САУ, а также настройку её технологических и эксплуатационных регулировок. ОАО «Элемент» является разработчиком КПА для регулятора РДЦ-450 авиационного двигателя АИ-450.

На этом этапе возрастает актуальность имитации и проверки измерительных каналов. И если для проверки или имитации общепромышленных датчиков, таких как термопары и термосопротивления, существует достаточное количество приборов, то, например, для датчиков типа ДБСКТ рынок представлен считанными производителями, в том числе ОАО «Элемент», в котором разработан цифровой прибор СКУП, который позволяет, как измерять, так и имитировать работу датчиков ДБСКТ. То есть один прибор позволяет выполнить и проверку, а при необходимости и метрологическую поверку, как датчика, так и соответствующего измерительного канала САУ. Данный прибор применяется как в эксплуатации ГТД, так и при его стендовых испытаниях [5].

## Заключение

Итак, рассмотрены общие подходы к разработке и применению стендов-имитаторов на всех стадиях жизненного цикла САУ ГТД.

Приведены практические примеры разработки и применения таких устройств, затронуты вопросы используемых технических средств и программного обеспечения. Рассмотрены некоторые аспекты алгоритмического и метрологического обеспечения.

Показано практическое применение математических моделей ГТД в составе стендов-имитаторов, работающих в условиях реального времени. Рассмотрена полная имитация и частичная имитация двухдвигательной установки на базе ГТД. Отмечена необходимость использования индивидуальных математических моделей и рассмотрен вариант её практической реализации.

## Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Елифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко, Г.Г. Грабовский и др. – К.: Техніка, 1998. – 312 с.
2. Волков Д.И., Качура В.А., Разладский А.А. Имитация двигательных и самолётных агрегатов при стендовых испытаниях авиационных двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 8/34. – С.135-138.
3. Программно-технические комплексы для испытания ГТД: математическое, метрологическое и алгоритмическое обеспечение / А.Г. Буряченко, Д.И. Волков, С.Н. Долгий, В.В. Сироткин // Авиадвигатели XXI века: Материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (6-9 декабря 2005 г.): Сб. тез. – М.: ЦИАМ. – 2005. – Т. 3. – С. 235-237.

*Поступила в редакцию 15.052008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.А. Положаенко, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.