

И. А. Кривошеев, А. Г. Годованюк

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГТД В СОСТАВЕ АДАПТИВНЫХ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

Предложена структура адаптивной отказоустойчивой системы автоматического управления и контроля (САУиК) для работы на борту самолета в случае отказа датчиков с целью повышения надежности, уменьшения затрат на доводку и испытания двигателя и ЛА в целом. Приведены разработанные алгоритмы и компоненты такой системы. САУ; испытания; доводка; ГТД

Характерными особенностями современных авиационных ГТД являются сложность конструкции, широкое применение электроавтоматики, развитой механизации и сложных законов управления для достижения требуемых характеристик [1, 4]. При этом к современным двигателям предъявляются высокие требования по ресурсу, надежности, безопасности полетов и экономичности при минимальных затратах и трудоемкости обслуживания.

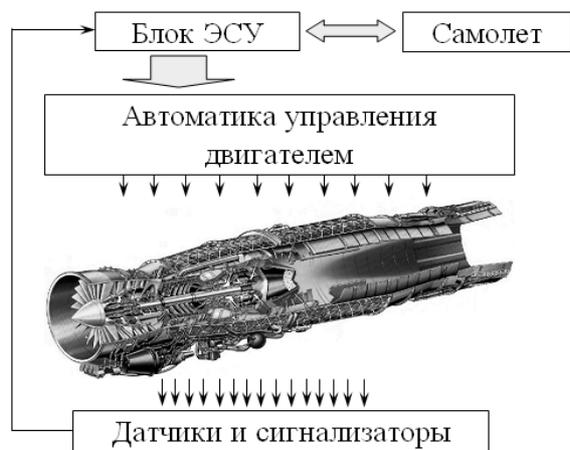


Рис. 1. Классическая структура построения САУ

Как правило, автоматическая система управления выполняется отдельно [2] от исполнительных механизмов автоматики и передает им сигналы на изменение положений регулирующих органов, при этом работает по данным с датчиков и сигнализаторов двигателя и командам пилота (рис. 1). С подобной системой зачастую анализ рабочих параметров двигателя осуществляется производителем блоков управления двигателя после останова двигателя по программам регистрации.

### 1. ФОРМУЛИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

При разработке современных газотурбинных двигателей (ГТД) в рамках концепции FADEC в электронной (цифровой) САУиК (системе автоматического управления и контроля) ЛА и двигателя на борту (в полете) и на земле (после и между полетами) реализуются функции управления, контроля и диагностики самолета и двигателя. Наиболее перспективным направлением является объединение функций управления и контроля двигателя в одном агрегате, что позволяет значительно сократить количество блоков и датчиков, обеспечить снижение веса, повысить надежность и эксплуатационную технологичность.

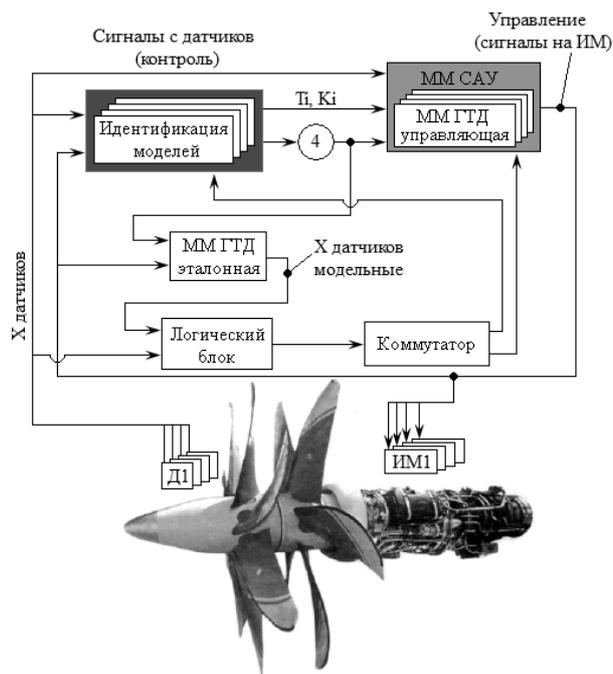


Рис. 2. Предлагаемая структура адаптивной отказоустойчивой САУиК

## 2. АДАПТИВНАЯ САУ

В связи с вышеизложенным, с целью уменьшения затрат на доводку и испытания двигателя, САУ и ЛА в целом, авторами предложена структура адаптивной САУиК для работы на борту самолета в случае отказа датчиков. При этом для обеспечения адаптивности и отказоустойчивости САУ управляет моделью двигателя (рис. 2), а реальный двигатель следует за моделью, для быстрого действия и обеспечения режима реального времени модель по структуре адаптируется к каналам контроля и управления, при этом используется набор моделей, с учетом разных комбинаций исправных и неисправных датчиков (и исполнительных механизмов); также на случай отказа всех датчиков имеется возможность для управления двигателем целиком по модели.

Рассогласование модельных сигналов и сигналов, поступающих с двигателя, может использоваться либо как признак неисправности конкретного датчика, либо как сигнал к идентифи-

кации модели (характеристик узлов). Для этого заранее определяются пороговые значения, переключение моделей в САУиК по команде логического блока реализует специальный коммутатор. Идентификацию моделей в САУиК по сигналам, поступающим с оставшихся исправными датчиков, реализуют специально для этого заготовленные идентификационные модели. Их тоже несколько – для разных комбинаций исправных датчиков. При этом желательно, чтобы для качественного анализа сигналов, выдачи команд в полете и анализа на земле инженерами записанных данных частота записи контролируемых параметров составляла по меньшей мере 100 Гц. Далее проанализированные данные поступают в управляющую математическую модель, которая выдает сигналы управления двигателем в зависимости от наличия команд, комбинаций исправных датчиков и отклонений параметров от заданных значений.

### ИДЕФО-МОДЕЛЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ ГТД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ИЛИ КОНТРОЛЯ (фрагмент 2 уровня)

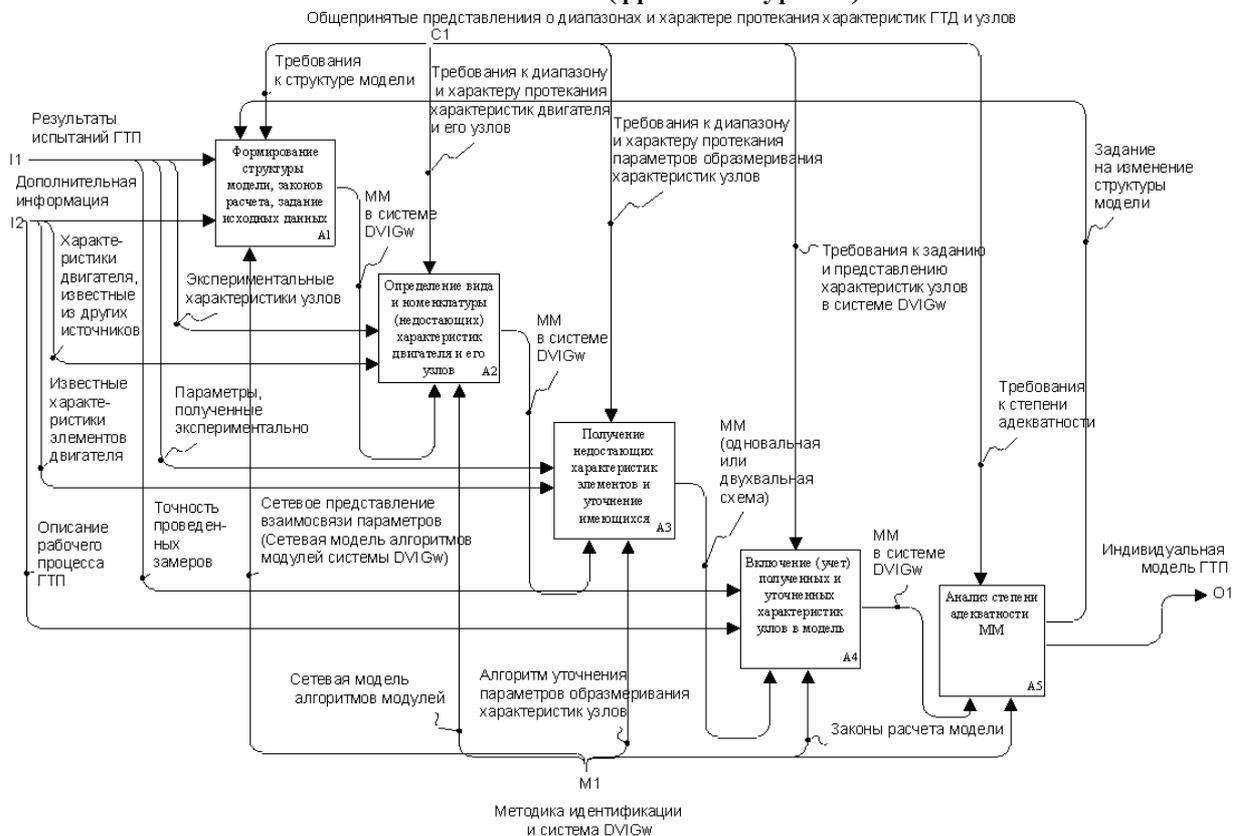


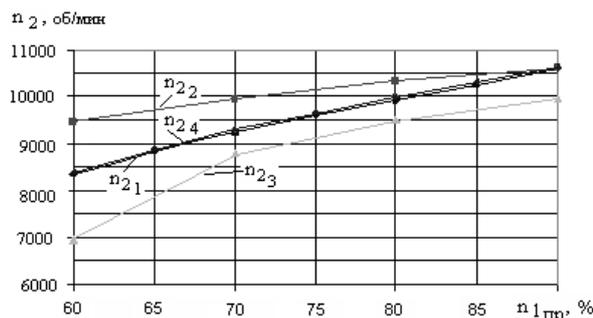
Рис. 3. Алгоритм идентификации параметров и характеристик ГТД по результатам испытаний и контроля в эксплуатации (для использования в составе адаптивной отказоустойчивой САУиК)

Такая новая концепция реализации САУиК ЛА и двигателя обеспечивает адаптивность и отказоустойчивость. Алгоритмы диагностики основаны на предложенном авторами обобщенном параметризованном представлении характеристик узлов, предварительном анализе влияния на их деформацию накопления отдельных видов дефектов, их связи с изменением характеристик двигателя в целом, с границами работоспособности двигателя и его элементов. Нанесение соответствующих ограничений на характеристики узлов, идентификация характеристик узлов [13] и их деформации по результатам контроля двигателя в эксплуатации позволяют локализовать отказы и предотказные состояния по видам дефектов и по элементам, где они имеют место. Это является основой нового эффективного алгоритма и метода параметрической диагностики.

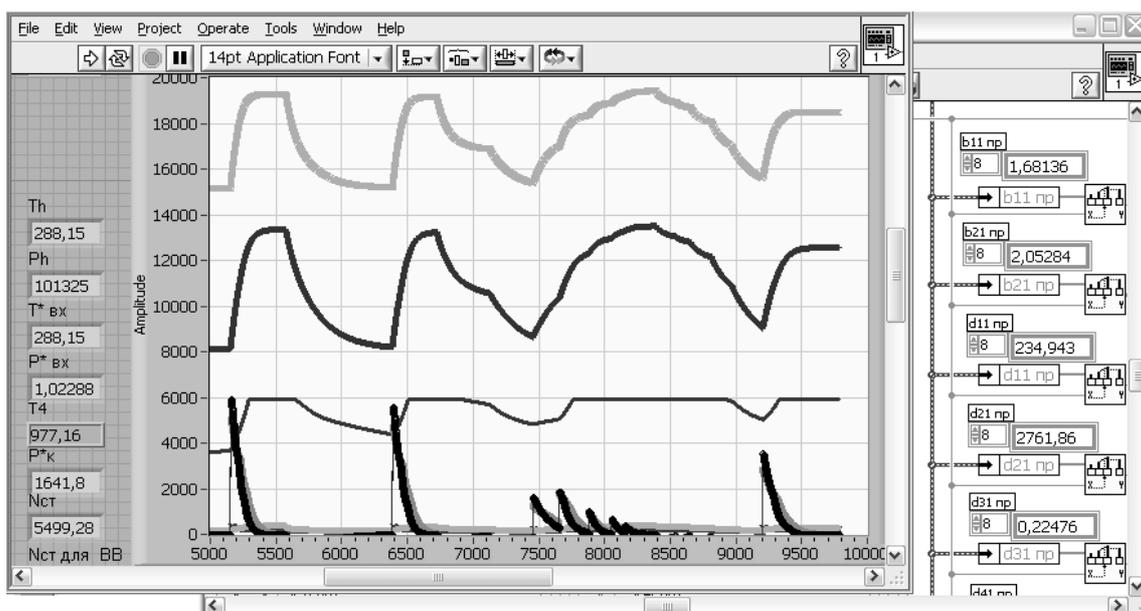
### 3. РЯД ВОЗМОЖНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ГТД И ЕГО САУ

Создание современной силовой установки и ее САУ можно представить в виде последовательности этапов, на каждом из которых осуществляются расчетно-теоретические исследования с применением моделей различной сложности и различной степени соответствия натурным характеристикам элементов САУ, проводятся экспериментальные исследования и анализ полученных результатов, а также принимаются

решения по выполнению последующих этапов работы. При проведении расчетно-теоретических исследований современных САУ ГТД возникает ряд трудностей, связанных с большим числом функций, выполняемых ею, большим диапазоном изменения внешних условий и режимов работы двигателей. В связи с этим создание САУ ГТД и проведение исследований с использованием таких моделей весьма трудоемкая задача.



**Рис. 4.** Зависимость частоты вращения компрессора высокого давления от приведенной частоты вращения компрессора низкого давления: 1 – результаты эксперимента; 2 – результаты, полученные по модели с априорными характеристиками; 3 – результаты, полученные по модели после уточнения характеристик компрессора; 4 – результаты, полученные по модели после уточнения характеристик



**Рис. 5.** Пример работы в режиме реального времени модели ГТД, реализованной в системе SCADA LabView, используемой для испытаний агрегатов САУ

Обычно основной задачей испытаний является установление соответствия параметров двигателя техническому заданию. По существу, необходимо по некоторой совокупности параметров, измеряемых в процессе испытаний, построить полные характеристики ГТД и его САУ, установить функциональные зависимости между входными и выходными параметрами, получить данные, необходимые для идентификации состояния двигателя и элементов автоматики, а также для оценки соответствия характеристик конкретных исследуемых экземпляров САУ и ГТД на установившихся и переходных режимах предъявляемым к ним техническим требованиям [5, 6, 7, 8, 12]. При решении этой задачи приходится сталкиваться с необходимостью получения и анализа большого объема информации, что объясняется рядом обстоятельств, связанных не только с изменением условий и режимов работы ГТД в широких пределах, но и с многоконтурностью современных САУ. Предложенный авторами алгоритм процессов получения и уточнения параметров и характеристик узлов по результатам испытаний и контроля в эксплуатации приведен на рис. 3.

Здесь использованы возможности разработанной в НИЛ САПР-Д технологии имитационного моделирования САМСТО и реализация проведена на основе специально разработанной для решения таких задач версии системы имитационного моделирования ГТД СИМ DVIG (рис. 4) [10, 11, 13].

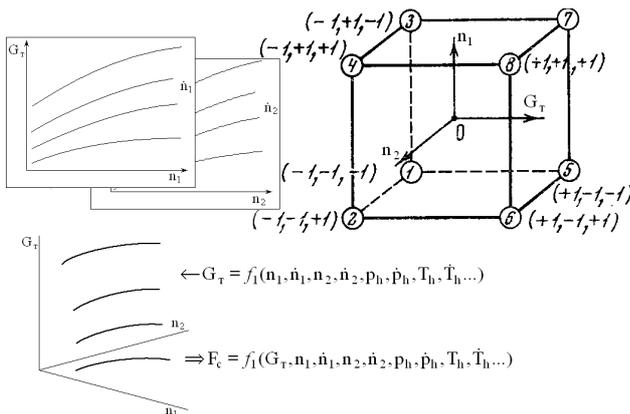


Рис. 6. Пример использования ПФЭ для получения фазового портрета

При этом обнаружено, что для конкретного двигателя (с определенным набором датчиков и исполнительных механизмов) рационально создание не универсальных, а специализированных моделей (соответственно – для идентификации и управления), при этом каждая из них строится с учетом номенклатуры предполагаемых

исправных датчиков. У авторов имеется опыт создания и использования моделей ГТД в составе САУ, при этом модели (ГТД с соосным винтовентилятором, см. рис. 2, ТРДД) были реализованы в системе LabView (рис. 5).

Рассмотрен вариант, когда модели строятся в среде SCADA LabView, но их отладка производится с использованием СИМ DVIG, созданных в среде САМСТО. Кроме того, рассмотрен вариант, когда с использованием динамической модели ГТД в среде СИМ DVIGwp [3] формируется многомерный фазовый портрет, он аппроксимируется (например, с использованием ПФЭ, см. рис. 6), и полученные регрессионные модели (со структурой, ориентированной на задачи идентификации и управления, с учетом предполагаемого набора исправных датчиков) используются в составе адаптивной отказоустойчивой САУиК.

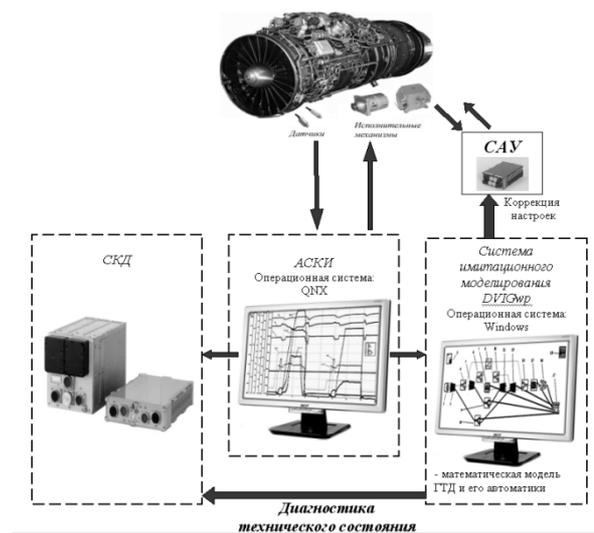


Рис. 7. Структура системы диагностики и контроля ТРДДФ

В условиях высокой стоимости авиационных двигателей эффективность их эксплуатации с одновременным выполнением требований безопасности полетов определяется не только их конструктивным совершенством, но и постоянным надежным и эффективным контролем и диагностированием технического состояния. Поэтому проблема разработки и применения в эксплуатации оптимальных средств и методов контроля, автоматизации процесса обработки информации о состоянии двигателя является одной из актуальных задач. Компоненты системы диагностики могут входить в состав адаптивной отказоустойчивой САУиК или использоваться автономно. На рис. 7 показана схема разработанной с участием авторов системы ди-

агностики и контроля состояния, используемой при доводке ТРДДФ.

В последние годы в нашей стране и за рубежом интенсивно развиваются автоматизированные бортовые системы контроля ГТД на базе БЦВМ. Данные системы кроме функций «пассивных» систем контроля (систем индикации параметров экипажу и регистрации для обслуживающего персонала) обрабатывают информацию непосредственно в полете и выдают необходимые рекомендации экипажу.

С целью уменьшения затрат на испытания и доводку ГТД и его САУ требуется рациональное сочетание экспериментальных и теоретических исследований, моделирование и применение автоматизированной обработки результатов испытаний. С этой целью и предлагается структура адаптивного САУ для использования на бортовой модели двигателя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как мы видим из приведенных наиболее часто встречающихся структур взаимодействия САУ и ГТД с целью дальнейшей диагностики характеристик узлов двигателя и ГТД в целом, все полученные данные снимаются после окончания двигателя по завершении полета или испытания. В таких случаях анализ данных проводится как разработчиком агрегатов управления, так и производителем самого ГТД, что в дальнейшем сказывается на надежности двигателя в положительную сторону, но при этом может занимать значительно больше времени, чем с использованием предлагаемой структуры САУ. Все это проводится с целью улучшения параметров цикла (температура газа перед турбиной и степень повышения давления в компрессорах, и др.) и уменьшения расхода топлива [9].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Черкасов Б. А.** Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей: Учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1988. 360 с.
2. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. Системы: Учеб. Серия: «Газотурбинные двигатели». В 5 томах, т. IV. М.: Машиностроение, 2007. 194 с.
3. **Тунаков А. П., Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А.** САПР газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2005. 272 с.
4. Теория автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов. Управление ВРД / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1976. 344 с.
5. **Сосунов В. А., Литвинов Ю. А.** Неустановившиеся режимы работы авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
6. **Сиротин С. А., Соколов В. И., Шаров А. Д.** Автоматическое управление авиационными двигателями: учеб. для авиац. техникумов. М.: Машиностроение, 1991. 176 с.
7. **Шевяков А. А.** Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. М.: Машиностроение, 1970. 660 с.
8. **Синяков А. Н., Шаймарданов Ф. А.** Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками: Учеб. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.
9. **Данилин О. Е., Бадамшин Б. И.** Задача оптимизации удельного расхода топлива ТВВД на основе интеллектуальных методов управления // Электронные устройства и системы: Межвузовск. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2008. С. 103–106.
10. **Кривошеев И. А., Иванова О. Н., Горюнов И. М.** Методы получения и использования характеристик узлов ГТД при имитационном моделировании // Вестник УГАТУ. 2006. № 3 (16). С. 127–135.
11. **Кривошеев И. А., Иванова О. Н.** Метод формирования и использования моделей ГТД на различных этапах проектирования, доводки и эксплуатации // Вестник УГАТУ. 2007. № 1 (19). С. 8–21.
12. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей / В. Г. Августинovich [и др.]. М.: Машиностроение, 1984. 200 с.
13. **Иванова О. Н.** Повышение эффективности идентификации имитационной модели по результатам испытаний // Проблемы современного машиностроения: Материалы всероссийск. молодежн. науч.-техн. конф. Уфа: УГАТУ, 2004. 180 с.

### ОБ АВТОРАХ



**Кривошеев Игорь Александрович**, декан факультета АД, проф., науч. рук. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1976). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (2000). Иссл. в обл. инф. техн. в двигателестроении.



**Годованюк Алексей Геннадьевич**, асп., мл. науч. сотр. каф. авиац. двиг. Дипл. магистр техн. и технол. по авиа- и ракетостроению (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. управления ГТД и их САУ.