

УДК 681.518

**В.В. НЕРУБАССКИЙ, Н.П. ВОЛОШИНА**

*АО «Элемент», Одесса, Украина*

## **CAU FADEC – ТЕРМИНОЛОГИЯ, ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ**

*Приводится краткая история развития систем управления авиационными двигателями – от простейших механических до современных цифровых электронных FADEC. Подробно описываются особенности CAU FADEC по сравнению с гидромеханическими системами, ее основные достоинства и недостатки. Дается описание термина FADEC, варианты интерпретации состава системы. Приводятся примеры серийных отечественных и зарубежных электронных CAU, оценивается их принадлежность к FADEC. Особое внимание уделено основным направлениям развития CAU FADEC, комментируются ключевые моменты каждого из направлений.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, система автоматического управления, FADEC, топливοδοзирующее устройство, распределенная CAU, исполнительный механизм, интеллектуальные датчики.

### **Введение**

Системы автоматического управления (CAU) авиационными газотурбинными двигателями (ГТД) прошли длительный путь развития – от простейших механических устройств с центробежным регулятором частоты вращения до сложнейших компьютеризированных комплексов, объединяющих десятки датчиков и исполнительных механизмов. Уже более 25 лет доминирующим типом CAU ГТД в мире, причем как в военной, так и в гражданской авиации, стали системы FADEC (Full Authority Digital Engine Control).

FADEC, являясь электронной системой с программным управлением и цифровыми каналами приема/передачи информации, наиболее полно соответствует общей концепции интеграции всего оборудования ЛА (самолета, вертолета) в единый комплекс, обеспечивающий контроль за его пространственным положением на всех этапах полета, а также оптимизацию траектории в зависимости от конфигурации ЛА. FADEC, придя на смену гидромеханическим CAU, позволила использовать такие законы управления и функции, которые ранее были недоступны или трудно реализуемы.

Большое разнообразие уже выполненных, серийно выпускаемых и эксплуатирующихся систем FADEC для различных типов авиационных ГТД, отсутствие подробной информации в связи с соображениями сохранения коммерческой тайны, а, иногда, недобросовестность некоторых разработчиков CAU и ГТД, авторов технических публикаций затрудняют однозначное понимание самого термина «FADEC», состава и конфигурации системы. Данная

статья является попыткой осмыслить историю, современное состояние и перспективы развития FADEC, а также оценить продукцию АО «Элемент» и других разработчиков CAU ГТД на предмет принадлежности к FADEC.

### **1. Краткая история развития FADEC**

Непрерывное улучшение характеристик и расширение области полетных режимов авиационных двигателей влекло за собой усложнение алгоритмов и законов управления.

Изначально CAU состояла из простых механических связей – рычагов, физически подключенных к двигателю. Перемещая эти рычаги, пилот или бортиженер мог управлять расходом топлива, мощностью и многими другими параметрами двигателя. Один из первых централизованных гидромеханических агрегатов CAU появился в Германии в годы II мировой войны: поршневой авиационный двигатель BMW-801 был оснащен устройством Kommandogerdt, объединившем все управляемые элементы в один рычаг.

Подобные CAU стали основными и для авиационных ГТД, достигнув к началу 1970-х годов очень высокой степени сложности. Так, гидромеханическая CAU ТРДД Pratt&Whitney JT9D-3 состояла более чем из 2100 деталей и занимала объем 28 дм<sup>3</sup>. Сложность таких систем заставляла идти разработчиков ГТД на технические компромиссы, результатом которых было некоторое увеличение удельного расхода топлива, снижение срока службы двигателя, особенно его горячих частей.

Появление более сложных ГТД с высокими параметрами термодинамического цикла и большим количеством регулируемых элементов

привело к усложнению законов управления и ужесточению требований по точности. В ответ на это в 1960-х годах появились электронные аналоговые САУ, не получившие широкого распространения из-за того, что электронные лампы не выдерживали условий работы на двигателях. Единственной такой системой, доведенной до серийного производства, стала САУ ТРДФ Rolls-Royce/SNECMA Olimpus 593 для сверхзвукового пассажирского самолета Concorde. Интересной особенностью этой системы, предвосхитившей появление более поздних цифровых систем, был отказ от резервной гидромеханической системы.

Повышение требований к экономичности ГТД в связи с топливным кризисом 1970-х годов, а также появление сверхминиатюрных твердотельных элементов в виде больших интегральных схем заставили вернуться к работам по электронным САУ, но уже в цифровом исполнении.

Сначала появились так называемые «супервизорные» САУ с «ограниченной ответственностью», в которых электроника выполняла функции надсистемных ограничителей и корректоров. При этом упрощенная гидромеханическая часть оставалась. Такими системами оснащались двигатели Rolls-Royce RB211-524, RB211-535C, General Electric CF6-80, украинские Д-18Т, Д-36, Д-136.

Дальнейшим шагом стала разработка цифровой САУ с «полной ответственностью» – FADEC. В 1983 г. в эксплуатацию поступил пассажирский самолет Boeing 757 с ТРДД Pratt&Whitney PW2000, впервые оснащенными FADEC. Первым военным двигателем с FADEC стал ТРДДФ Pratt&Whitney F100-PW-229.

За прошедшие годы сменилось несколько поколений FADEC (таблицы 1 и 2), однако точно определить, чем они отличаются, оказалось сложной задачей. Например, известно, что FADEC 2 получила дополнительные функции (контроль технического состояния и диагностика двигателя, активное охлаждение электронных компонентов), а вычислительная мощность FADEC 3 по сравнению с FADEC 2 увеличилась на порядок.

Сначала появились так называемые «супервизорные» САУ с «ограниченной ответственностью», в которых электроника выполняла функции надсистемных ограничителей и корректоров. При этом упрощенная гидромеханическая часть оставалась. Такими системами оснащались двигатели Rolls-Royce RB211-524, RB211-535C, General Electric CF6-80, украинские Д-18Т, Д-36, Д-136.

Таблица 1

Этапы развития FADEC на самолетах фирмы Airbus

Модель двигателя	Поколение FADEC	Тип самолета
CF6-80C2	FADEC 1	A300-600
CF6-80E	FADEC 2	A330
CFM56-5A	FADEC 1	A320
CFM56-5B	FADEC 1 & 3	A318, A319, A320, A321
CFM56-5C	FADEC 2	A340
GP7200	FADEC 3	A380
LEAP-1A	FADEC 3	A320Neo
TR400-D6	FADEC 3	A400M

Таблица 2

Этапы развития FADEC на самолетах фирмы Boeing

Модель двигателя	Поколение FADEC	Тип самолета
CF6-80C2	FADEC 1	747-400, 767, MD11
PW2000	FADEC 1	757
CFM56-7B	FADEC 2 & 3	737NG
GE90-94B	FADEC	777-200/300
GE90-115B	FADEC 3	777-200ER/300ER
GEnx-1B	FADEC 3	787
GEnx-2B	FADEC 3	747-8
LEAP-1B	FADEC 3	737MAX

## 2. Особенности FADEC

Применение САУ FADEC обеспечивает снижение затрат не только эксплуатантам, но и разработчикам ГТД. Такие системы проще и легче гидромеханических, их гораздо легче совершенствовать, отслеживая модификации данного типа двигателя на протяжении всего срока его службы. Совершенствование гидромеханической САУ является дорогостоящим процессом, которое может быть оправдано только значительным улучшением характери-

стик двигателя. При проведении исследований с целью получения оптимальных характеристик двигателя не требуется изменения аппаратуры FADEC, а необходимо только изменение программного обеспечения (ПО). Это позволяет исследовать любые возможности улучшения характеристик двигателя, какими бы незначительными они ни были. Например, отмечалось, что при доводке ТРДД Pratt&Whitney PW2000 незначительные модификации проводились за 1-2 дня, а полное изменение ПО управления проводилось за 7 дней. Кроме того, электрон-

ная цифровая САУ позволяет значительно сократить программу испытаний двигателя и программу испытаний самолета с данным двигателем.

Как и любая сложная система, FADEC имеет свои положительные особенности и «узкие места».

Преимущества FADEC:

- увеличение числа обрабатываемых параметров;
- улучшение топливной экономичности двигателя за счет повышения точности поддержания параметров и оптимизированных законов управления;
- автоматическая защита от превышения предельных параметров;
- повышенная безопасность за счет избыточности (два независимых канала) и встроенной системы контроля (Built-in Test);
- облегченное управление двигателем с гарантированной величиной тяги (мощности);
- улучшенное взаимодействие с экипажем;
- автоматический запуск и восстановление работы двигателя;
- облегченная интеграция с электронными системами ЛА;
- обеспечение контроля технического состояния и диагностика двигателя;
- снижение массы САУ;

Недостатки FADEC:

- отсутствие аварийного ручного управления приводит к остановке двигателя при полном отказе САУ;
- отсутствие аварийного ручного управления делает невозможным изменение режима работы двигателя при «зависании» САУ;
- большие затраты времени на разработку и валидацию системы;
- невозможность превышения ограничений в случае необходимости.

Высокая надежность САУ FADEC обусловлена ее достоинствами и длительным опытом доводки как программной, так и аппаратной частей. Вышеуказанные недостатки проявляются редко, но все же встречаются. Так 9 мая 2015 г. произошла катастрофа опытного самолета Airbus A400M при взлете в Севилье (Испания) по причине отказа компьютеров FADEC на трех из четырех двигателей. Директор по стратегическому развитию компании Airbus Маруан Лахуд сообщил СМИ, что на упавшем самолете было «неправильно установлено ПО для управления двигателями». Как говорится, — комментарии излишни!

### **3. Определение термина FADEC, вариации на тему FADEC и состав системы**

В большинстве литературных источников дается достаточно однозначное определение

термина FADEC [2, 4]. FADEC – цифровая система управления двигателем с «полной ответственностью». «Полная ответственность» предполагает отсутствие какой-либо возможности «ручного» влияния на двигатель, т.е. все действия по обработке параметров, в том числе задание режима работы пилотом, и выдаче управляющего воздействия осуществляются компьютером.

Ядром FADEC является управляющий электронный блок или компьютер системы, который может называться EEC (Electronic Engine Controller), ECU (Engine Control Unit) или DECU (Digital Engine Control Unit). Это определяется исключительно традициями разработчика двигателя, например фирма General Electric предпочитает использовать аббревиатуру ECU, а Pratt&Whitney – EEC. EEC или ECU не являются FADEC, а лишь ее компонентом.

Другим компонентом FADEC являются источники информации: сигнал положения РУД, самолетные и двигательные датчики, сигналы обратной связи от исполнительных механизмов.

FADEC выдает управляющие сигналы на топливοδοзирующее или управляющее гидромеханическое (иногда – электрогидравлическое или гидропневматическое) устройство. Последнее может называться FMU (Fuel Metering Unit) или HMU (HydroMechanical Unit) в зависимости от предпочтений разработчика двигателя. Силы, воздействующие на клапаны перепуска воздуха или поворотные лопатки статора компрессора, обеспечиваются путем использования давления топлива или воздуха. Клапаны управления гидравлической части системы могут централизованно размещаться в блоке HMU или на индивидуальных приводах вместе с блоком FMU в системе распределения топлива. Централизованный вариант расположения применяется в двигателях фирм General Electric и CFMI. Децентрализованный вариант, где сервоклапаны расположены на индивидуальных приводах, используется в двигателях фирм Pratt&Whitney, IAE и некоторых двигателях фирмы Rolls-Royce. Все остальные элементы, контролируемые FADEC, относятся к другим системам двигателя, таким, как воздушная система или система зажигания.

Важной особенностью электропитания электронных компонентов FADEC является наличие отдельного генератора переменного тока, размещенного на коробке приводов двигателя. Существует и альтернативное электропитание от электросистемы самолета. Однако, имея собственный электрогенератор, FADEC является независимой от этой электросистемы при нормальной работе. В случае отказа электро-

системы самолета такой отказ не повлияет на работу двигателя.

Если все-таки предусмотрено ручное управление двигателем, то такая САУ называется ЕЕС или ECU.

Большая часть вышесказанного относится к одному из основных вариантов интерпретации термина «FADEC» и состава системы. Однако существует и другой распространенный вариант [1], когда под FADEC подразумевают ЕЕС или ECU в комплекте с датчиками – по мнению одного из авторов, и топливodoзирующими элементами FMU или HMU и сервоприводами – по мнению второго автора.

Еще больший разнобой в термин «FADEC» вносит анализ описаний и конфигураций существующих электронных САУ. С зарубежными системами все выглядит более-менее благополучно, т.е. САУ известных гражданских ТРДД PW2000, PW4000, CFM-56-5/7, CF-34-8/10, CF6-80C2/E, GE90, V2500, Trent 500/700/800/900/1000 являются «настоящими» FADEC. Это же относится и к САУ ТРДД SaM-146, имеющей французское происхождение.

Но, например, известные российские разработки - ЭСУ-436 (двигатель Д-136-148), РЭД-90 (ПС-90А) - не являются FADEC, т.к. имеют резервную систему управления. Это же относится и к нашим отечественным САУ: РДЦ-450М (АИ-450М) и БУК-500 (МС-500). При этом для таких систем часто используется термин «САУ типа FADEC».

Более того, на просторах Internet авторам попалась статья, в которой САУ ТВГТД PW200, имеющая только один канал и резервную гидромеханическую часть, также называлась FADEC!

#### 4. Перспективы развития FADEC

Развитие и совершенствование FADEC идет по нескольким пересекающимся направлениям. В последние годы наиболее перспективными считаются следующие:

а) переход от существующей централизованной к децентрализованной (распределенной) архитектуре системы [5].

Использование интеллектуальных датчиков и исполнительных механизмов, шин передачи данных и концентраторов данных, разделение функций между распределенными на планере ЛА и двигателе блоками FADEC позволит повысить надежность, уменьшить массу за счет уменьшения количества разъемов и сокращения длины кабельных сетей, упростить модернизацию системы, сократить сроки проектирования и освоения производства;

б) использование открытой архитектуры и создание «универсальной» FADEC (Universal

FADEC - UF) модульной конфигурации [3].

Применение унифицированных блоков питания и каналов передачи данных, реконфигурируемых модулей ввода/вывода, сменных и взаимозаменяемых модулей позволит существенно упростить и удешевить разработку и модификацию системы, улучшить ее адаптивность к различным типам двигателей;

в) широкое использование в составе САУ высокоуровневых математических моделей реального времени, встроенных как в структуру законов управления двигателем, так и в схемы обнаружения неисправностей электронных компонентов и узлов двигателя.

Создание высокопроизводительных микропроцессоров сделало возможным «встраивать» нелинейные поузловые термогазодинамические модели ГТД в состав САУ. При этом появляется возможность управлять двигателем по расчетным параметрам, непосредственно характеризующим рабочий процесс в двигателе, но недоступным для измерения (запасы газодинамической устойчивости компрессоров, температура газа в камере сгорания, тяга двигателя и др.). Другой областью применения «бортовых» математических моделей – это компенсация отказов датчиков параметров рабочего процесса в двигателе и параметров, характеризующих режим полета.

#### Заключение

Приведенный, далеко не полный обзор разнообразия взглядов на FADEC не способствует формированию однозначного понимания состава этой системы – даже у авторов статьи мнения не всегда совпадают. Решать данную проблему необходимо на законодательном уровне с привлечением FAA, EASA, ГАСУ, АР МАК и других государственных и межгосударственных структур. Первые шаги в этом направлении уже сделаны [2].

Считаем целесообразным для выработки единого понимания привлечь к обсуждению ученых и ведущих специалистов авиадвигателестроения и по его результатам обратиться в ГАСУ и Национальный орган стандартизации с предложением разработать стандарт, определяющий термин, состав, функции САУ FADEC.

#### Литература

1. Kumar N. Full Authority Digital Engine Control (FADEC) [Text] / Nikhil Kumar C., Shrvan Kumar // International Journal of Emerging Trends in Science and Technology. JETST- Vol. 02, Issue 10, 2015. – p. 3298-3302.
2. US Department of Transportation. Federal Aviation Administration. Advisory Circular 33.28-3. ANE-111. 5/23/14.

3. Behbahani A. Achieving AFRL universal FADEC Vision with open architecture addressing capability and obsolescence for military and commercial applications [Text] / Alireza R. Behbahani // Air Force Research Laboratory/ Wright-Patterson Air Force Base, OH 45433-7251. November 2006.

4. Propulsion - Avionics. Jet Engine Configuration. FADEC. Book 1, Module 14. B2 14.1 Issue 2 22. – 62 p.

5. Culley D. The Need and Challenges for Distributed Engine Control [Text] / Dennis Culley // NASA Glenn Research Center. Cleveland, Ohio. ASME Turbo Expo 2013. June 3-7, 2013, San Antonio, Texas, US

*Поступила в редакцию 14.06.2017 г.*

**В.В. Нерубаський, Н.П. Волошина. САК FADEC – термінологія, історія та сучасний стан**

*Наводиться скорочена історія розвитку систем керування авіаційними двигунами - від найпростіших механічних до сучасних цифрових електронних FADEC. Детально описуються особливості САУ FADEC у порівнянні з гідромеханічними системами, її основні переваги та недоліки. Дається опис терміна FADEC, варіанти інтерпретації складу системи. Надаються приклади серійних вітчизняних і зарубіжних електронних САУ, оцінюється їх належність до FADEC. Особливу увагу приділено основним напрямкам розвитку САУ FADEC, коментуються ключові моменти кожного з напрямків.*

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, система автоматичного керування, FADEC, паливоподаючий пристрій, розподілена САУ, виконавчий механізм, інтелектуальні датчики.

**V.V. Nerubaskiy, N.P. Voloshina. FADEC – terminology, history and modern state**

*A brief development history of aircraft engines control systems is given - from the simplest mechanical to modern digital electronic FADEC. The features of the FADEC automatic control system in comparison with hydromechanical systems, its main advantages and disadvantages are described in detail. The description of the FADEC term, variants of the interpretation of the composition of the system is given. Examples of serial domestic and foreign electronic control systems are given, their relevance to FADEC is assessed. Particular attention is paid to the main directions of the FADEC development; the key points of each of the directions are documented.*

**Key words:** gas turbine engine, automatic control system, FADEC, fuel metering unit, distributed automatic control system, actuator, intelligent sensors.