

УДК 621.45

Ф. МОХАММАДСАДЕГИ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЫВНЫХ И НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЕГО ПРЕДПОМПАЖНОГО СОСТОЯНИЯ

Обоснована необходимость разработки и внедрения систем автоматического регулирования предупреждения помпажа осевого компрессора авиационного ГТД. Рассмотрена динамика потери газодинамической устойчивости ступени компрессора, приведены результаты численного моделирования обтекания профиля пера лопатки на расчетных и срывных режимах, выполнены экспериментальные исследования по выявлению информативных критериев обнаружения предпомпажного режима. Сформулированы основные направления по разработке систем предупреждения помпажа компрессора, главными из которых являются выявление признака зарождения помпажа и разработка автоматических систем его предупреждения.

Ключевые слова: неустойчивая работа ГТД, осевой компрессор, помпаж, вращающийся срыв, система предупреждения помпажа.

Введение

В практике эксплуатации авиационной техники и наземных установок с газотурбинным приводом среди сравнительно частых причин отказов происходит нарушение устойчивой работы ГТД, что сопровождается аварийными ситуациями. Нестационарность потока воздуха на входе в компрессор авиационного двигателя может возникнуть по различным причинам, например, из-за кривой обдувки воздухозаборника при полете самолета со скольжением, несимметричного потока воздуха на входе в двигатель при боковом ветре, изменения режима работы двигателя, маневра самолета или вертолета, попадания самолета или вертолета в зону турбулентности, отказов топливной автоматики, попадания струи горячих газов на вход в двигатель от предыдущего самолета при рулении или при полете парой и др.

Наиболее типичные формы газодинамической неустойчивости – вращающийся срыв и помпаж компрессора. Несмотря на достигнутые успехи в изучении этих сложных явлений, разработка мер по предотвращению помпажа и вращающегося срыва в ГТД остается актуальной.

1. Постановка задачи

Помпаж газотурбинного двигателя как физическое системное явление по современным представлениям – газодинамический неустойчивый автоколебательный режим работы компрессора и его сети, характеризующийся сильными низкочастотными (515 Гц) колеба-

ниями параметров (давления, температуры, расхода воздуха) по всей проточной части двигателя [1].

На рис. 1 приведена запись развития помпажа в компрессоре турбовального двигателя, полученного при стендовых испытаниях.

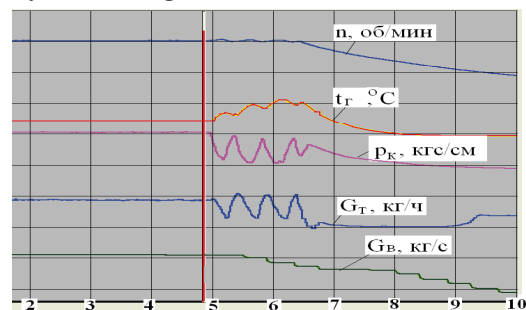


Рис. 1. Изменение параметров при помпаже компрессора

Помпажные явления приводят к выходу из строя лопаток компрессора, перегреву лопаток турбины, низкочастотной вибрации, осевому перемещению ротора, выходу из строя опор и уплотнений и, как следствие, к динамическим напряжениям, во много раз превосходящим напряжения, на которые рассчитывалась конструкция.

Испытания двигателя на стенде показали, что помпаж компрессора развивается за время порядка 0,2 с. Практически все существующие алгоритмы защиты осевого компрессора от помпажа рассчитаны не на предупреждение возникновения неустойчивости в компрессоре,

а на парирование уже начавшегося помпажа. Из-за этого защищенность силовой установки летательного аппарата от помпажа двигателя не может быть надежно обеспечена.

Необходимы разработка и внедрение систем автоматического регулирования предупреждения помпажа на ранней стадии. При этом одной из главных задач является выявление признака зарождения помпажа и разработка автоматических систем его предупреждения.

2. Моделирование неустойчивых режимов ступени осевого компрессора

Для адекватного представления о физических процессах, происходящих при помпаже, и практического управления ими необходимо решить несколько задач:

- идентифицировать критичный по газодинамической устойчивости каскад компрессора;
- выявить предсрывные процессы в компрессоре и выработать информативные критерии и методы их диагностики;
- определить уровни управляющих воздействий на двигатель, достаточные для предупреждения или прекращения помпажа.

Решение этих задач может быть осуществлено с помощью численного моделирования.

Помпажу всегда предшествует вращающийся срыв, возникающий в результате возмущений потока на входе в компрессор или выходе из него [2].

Известны два основных механизма порождения срыва:

- вращающееся длинноволновое синусоидальное возмущение осевой скорости (модальная волна);
- местное (пиковое) возмущение, быстро развивающееся от первоначального размера и охватывающее, несколько межлопаточных каналов.

Однако существенной особенностью срыва и помпажа в системе компрессора является пространственное распространение зон отрывных течений в межлопаточных каналах в окружном и продольном направлениях, что приводит к необходимости моделировать течение в колесе компрессора целиком, без использования условия периодичности в окружном направлении, что существенно увеличивает размерность задачи. С другой стороны, практическую ценность при моделировании представляет не информация о кинематическом состоянии потока в каждой точке тракта компрессора, а возможность определения моментов возникновения срыва и перерастания его в помпаж, что позволяет использовать упрощенные модели течения в межлопаточном канале.

Для выполнения поставленной задачи использован программный пакет CAE класса, а

именно газодинамический решатель, основанный на методе конечных элементов, а также дополнительные турбоинструменты на базе единой рабочей платформы. Схема проекта приведена на рис. 2.



Рис. 2. Схема проекта

На рис. 3 представлены модели профиля рабочей лопатки первой ступени компрессора турбовального ГТД и межлопаточного канала.

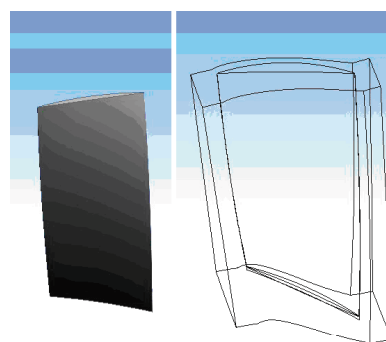


Рис. 3. Модели лопатки и межлопаточного канала

В работе [3] рассмотрена система, соответствующая авиационному ГТД, которая состоит из компрессора, некоторой небольшой емкости (камеры сгорания), в которой можно пренебречь инерционностью потока, и дросселя (соплового аппарата турбины). Работа системы в точке *a* (рис. 4), безусловно, устойчива.

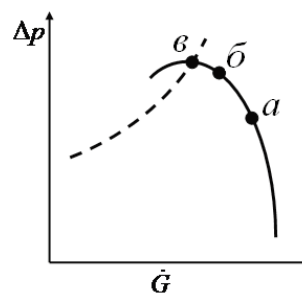


Рис. 4. Напорная характеристика ступени

При уменьшении расхода воздуха увеличивается давление за компрессором, но система остается устойчивой, хотя изменяются условия обтекания лопаток и в межлопаточном канале возникают срывные явления (точка *b*). При дальнейшем уменьшении расхода воздуха и переходе на участок левее точки *b* происходит снижение массового расхода воздуха, течение оказывается неустойчивым и возникает движение воздуха в обратную сторону.

На рис. 5 приведены результаты моделирования скорости течения в периферийной

части межлопаточного канала при обтекании профиля на различных режимах работы.

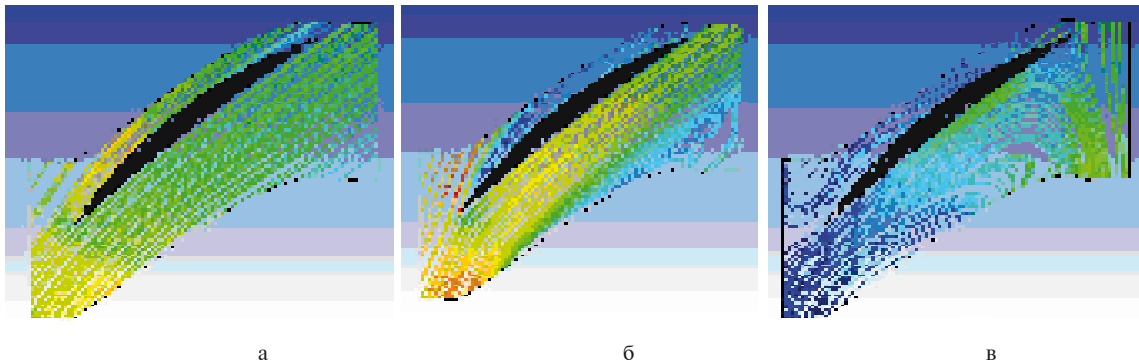


Рис. 5. Эпюры скоростей потока при обтекании профиля:
а – бесрывное обтекание; б – формирование срыва потока на спинке профиля; в – помпажный режим

Моделирование показало, что на устойчивых режимах работы (точка *а*) происходит бесрывное обтекание профиля. При приближении к границе устойчивости (точка *б*) на спинке профиля возникает вращающийся срыв потока, а в точке *в* начинается обратное течение воздуха в межлопаточном канале (помпаж). Отсюда следует, что развитие срыва во времени может быть выявлено до наступления полномасштабного помпажа. Срывные явления можно определить по пикам повышения давления, а промпаж – по «провалам» давления за компрессором и сохранении относительной амплитуды $P_{K \max} / P_{K \min} \approx 1,6 \dots 1,7$ [2].

В работе [4] приведены порядки частот колебаний давления за компрессором при различных видах неустойчивости:

- помпаж $\sim 10^1$ Гц;
- искажение поля скоростей на входе и вращающийся срыв $\sim 10^2 \dots 5 \cdot 10^3$ Гц.

И в том, и в другом случае колебания давления, строго говоря, являются негармоническими. Тем не менее, такой колебательный процесс можно обработать с помощью скользящего быстрого преобразования Фурье (БПФ), идентифицируя срывной процесс по изменению спектральных составляющих в определенных диапазонах частот.

В последнее время для вторичной обработки сигнала с малоинерционных датчиков давления, имеющего негармоническую (срывную) форму в виде пиков используется Wavelet-преобразование. Однако согласно [5], время, необходимое для идентификации начинающегося срыва с помощью БПФ, составляет около 40 оборотов ротора, а с помощью Wavelet-преобразования – до 400 оборотов. Таким образом, при частоте вращения ротора 12000...18000 об/мин на обработку сигнала БПФ потребуется 0,13...0,2 с, что соизмеримо

со временем перерастания срыва в помпаж, а при Wavelet-преобразовании – 1,3...2 с, что не позволит своевременно парировать помпаж. Возможным способом обработки таких случайных процессов может быть использование адаптивных полосовых фильтров, настройка которых производится по информации датчика частоты вращения ротора. Как показано в работе [6], время обработки процесса с помощью оптимального адаптивного полосового фильтра может составлять порядка 0,1 с, что может позволить своевременно сформировать сигнал на парирование опасного режима.

3. Результаты экспериментальных исследований модельной ступени

Экспериментальная установка представляет собой одноступенчатый осевой компрессор с пятью рабочими лопатками. Частота вращения ротора – 2600 об/мин. Возмущения вносились дросселированием на выходе из компрессора на 25%, 50% и 75%.

Контролируемый параметр – статическое давление воздуха на выходе из крыльчатки. Сигнал с датчика подавался на компьютер, где записывался и обрабатывался с помощью БПФ.

На графике рис. 6 представлены результаты полосовой фильтрации колебаний давления воздуха (в полосах по 1/6 октавы) без дросселирования и при дросселировании на 50%.

При увеличении степени дросселирования возрастает амплитуда колебаний на первой лопаточной частоте (216 Гц), возрастает также и вторая лопаточная частота. Более высокие частоты увеличиваются несущественно.

Таким образом, кроме общего уровня пульсаций давления можно выделить несколько спектральных составляющих, реагирующих на возникновение и развитие вращающегося срыва – предвестника помпажа.

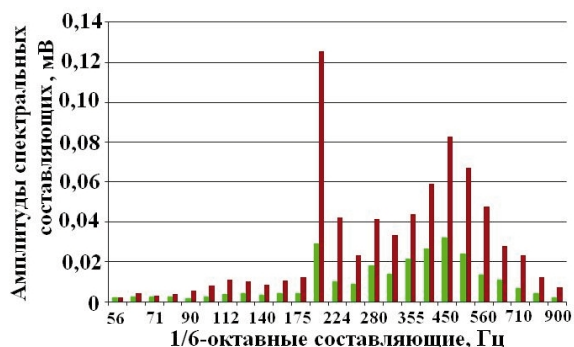


Рис. 6. Спектральные составляющие пульсаций давления за ступенью компрессора

Заключение

Существующие противопомпажные системы ГТД включаются в работу уже при развитии помпажа, хотя его предшественник вращающийся срыв начинается значительно раньше и может служить информационным критерием для включения его в систему автоматики двигателя. Кроме общего уровня пульсаций давления можно выделить несколько спектральных составляющих, реагирующих на возникновение и развитие вращающегося срыва – предвестника помпажа.

Повысить надежность срабатывания противопомпажной защиты и полнее использовать возможности газотурбинного двигателя за счет исключения ложных срабатываний системы можно за счет одновременного использования нескольких источников информации. Сигнал,

получаемый от одного источника, подтверждается (или блокируется) сигналом от другого источника иной физической природы.

Литература

1. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах [Текст] / В.В. Казакевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 263 с.
2. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях [Текст] / В.Г. Августинович, Ю.Н. Шмотин, А.П. Сипатов и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 536 с.
3. Кампти Н. Аэродинамика компрессоров: пер. с англ. [Текст] / Н. Кампти. – М.: Мир, 2000. – 688 с.
4. Киприч Т.В. Исследование методов и моделей обнаружения помпажных явлений в системе автоматического управления ГТД [Текст] / Т.В. Киприч, В.Н. Харитонов, В.И. Дубровин // Авиационно-космическая техника и технология: – 2008. – 9(56). – С. 206-210.
5. Leinhos D. Rotating Stall Inception with Inlet Distortion in the Low Pressure Compressor of a Turbofan Engine [Text]/D. Leinhos, B. Huss, L. Fottner. Proc. of the 19 Simp. Aircraft Integrated Monitor Systems/ Garmisch-Partenkirchen, 1998. – p. 347 – 366.
6. Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики двигунів: моногр. [Текст] / Н.І. Бурау, Л.Л. Яцко, О.М. Павловський, Ю.В. Со-пілка. – К.: НАУ, 2012. – 152 с.

Поступила в редакцию 08.05.2014

Ф. Мохаммадсадегі. Моделювання срывних і нестійких режимів роботи ступені осевого компрессора для діагностування його предпомпажного стану

Обґрунтовано необхідність розробки і впровадження систем автоматичного регулювання запобігання помпажа осевого компрессора авіаційного ГТД. Розглянуто динаміку втрати газодинамічної стійкості рівня компрессора, приведені результати чисельного моделювання обтікання профілю пера лопатки на розрахункових і зривних режимах, виконані експериментальні дослідження по виявленню інформативних критеріїв виявлення предпомпажного режиму. Сформульовані основні напрями по розробці систем запобігання помпажа компрессору, головними з яких є виявлення ознаки зародження помпажа і розробка автоматичних систем його запобігання.

Ключові слова: нестійка робота ГТД, осевий компрессор, помпаж, обертовий зрив, система запобігання помпажа.

F. Mohammadsadeghi. Simulation of stalling and unsteady operating modes of axial compressor stage for detecting the state stall appears

Paper addresses the problem of automatic control system improvement by integrating the antisurge algorithms for axial compressor of aircraft GTE. Paper considers the dynamic exhaustion of gas-dynamic stability of compressor stage, the results of numerical simulation of airflow flowing the airfoil at design and surge modes, the experimental researches to form the criteria that identify the compressor state right before falling into the surge. Authors formulated basic ways for developing the surge preventing systems. Basic ways are forming the algorithms that allow detecting the surge origination and the systems that implement the proposed algorithms.

Keywords: Unstable operation of GTE, axial compressor, surge, rotation stall, surge preventing system.