

УДК 621.45

Канд. техн. наук В. С. Чигрин, Ф. Мохаммадсадеги*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

Рассмотрена динамика потери газодинамической устойчивости ступени компрессора, выполнены экспериментальные исследования по выявлению информативных критериев обнаружения предпомпажного режима. Обоснована необходимость разработки и внедрения систем автоматического регулирования предупреждения помпажа компрессора ГТД. Сформулированы основные направления по разработке систем предупреждения помпажа компрессора, главными из которых являются выявление информативных признаков зарождения помпажа и разработка автоматических систем его предупреждения.

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

Введение и постановка задачи

В практике эксплуатации авиационной техники 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. Для самолета или вертолета, имеющего в составе вооружения управляемые ракеты (УР) или блоки орудий для пуска неуправляемых ракет (НАР), которые расположены вблизи воздухозаборников двигателей, потеря газодинамической устойчивости (помпаж) возникает при попадании на вход в двигатель струи горячего газа из сопла ракеты (рис. 1). Факел НАР С-8 на расстоянии пяти метров от пусковой установки имеет диаметр не менее метра [1], таким образом, при нахождении ракеты на расстоянии 8...10 м от пусковой установки (через 0,15...0,18 с после пуска ракеты) горячие газы уже попадают в воздухозаборник двигателя [2].

Увеличение температуры на входе в двигатель приводит к резкому снижению расхода воздуха в компрессоре, изменению треугольников скоростей потока на входе в лопаточный венец и срывному обтеканию профиля лопатки с дальнейшим развитием срыва и помпажа.



Рис. 1. Пуск НАР с вертолета
(<http://www.interfax.ru/photo/2001/23442>)

Для вертолета наиболее опасным является режим пусков ракет с малой высоты в режиме висения. При попадании в воздухозаборник ГТД газовой струи ракетного двигателя падает плотность воздуха, поступающего в ГТД, и его расход через двигатель. При срабатывании противопомпажной системы резко уменьшается мощность на валу двигателя, а у экипажа не остается резерва времени для восстановления работы двигателя и запаса высоты для посадки вертолета на режиме авторотации.

Как показано в работе [1], основным фактором, определяющим уровень скорости возрастания температуры на запас газодинамической устойчивости компрессора, является не длительность воздействия, а интенсивность роста температуры

на входе в двигатель по времени $\Delta T_1 / \Delta t$. Помпаж компрессора происходит при интенсивности возрастания температуры ΔT_1 по времени 2000...3000 град/с. За время 0,05 с это соответствует повышению температуры всего на 100...150 °С, что реально при попадании горячих газов в воздухозаборник двигателя при пусках ракет.

На рис. 2 показано изменение основных параметров потока в двигателе при пуске ракеты с вертолета.

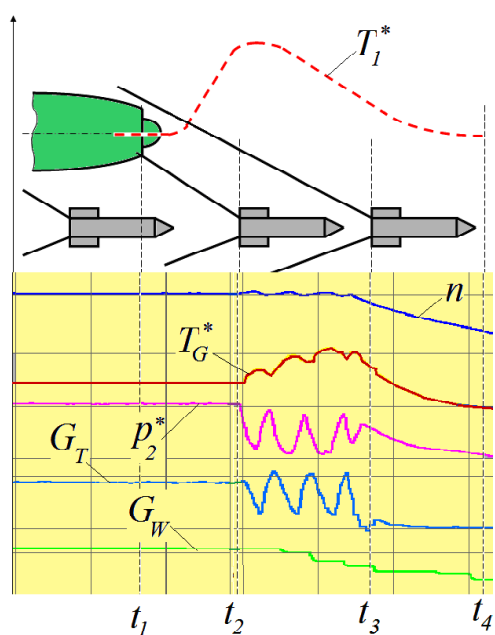


Рис. 2. Характер изменения параметров потока при помпаже:

ΔT_1 – температура воздуха на входе в двигатель;
 n – частота вращения ротора; T_G^* – температура газа перед турбиной; p_2^* – давление воздуха за компрессором; G_T – расход топлива; G_W – секундный расход воздуха через двигатель

Время t_1 соответствует выходу ракеты из пусковой установки. В момент времени t_2 резко повышается температура газа перед турбиной, возникают пульсации давления воздуха за компрессором, снижается расход воздуха через двигатель и начинается помпаж компрессора. Автоматика двигателя регулирует подачу топлива в камеру сгорания в соответствии с расходом воздуха. В момент времени t_3 по пульсациям давления воздуха за компрессором срабатывает противопомпажная защита и резко уменьшает подачу топлива в камеру сгорания. Происходят падение частоты вращения ротора и быстрое снижение мощности двигателя. В момент времени t_4

по команде противопомпажной системы двигателя выключился.

Испытания 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. Для его парирования выполняются поворот лопаток направляющих аппаратов, перепуск воздуха из-за неустойчиво работающих ступеней, уменьшение подачи топлива в камеру сгорания до уровня режима малого газа или полной отсечки подачи топлива, что приводит к существенному уменьшению тяги (мощности) ГТД.

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 двигателя.

Помпажу всегда предшествует вращающийся срыв, возникающий в результате возмущений потока на входе в компрессор или выходе из него [3].

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.

Выполненное численное моделирование [4] основано на решении системы уравнений Навье-Стокса в дифференциальной форме, осредненных по Рейнольдсу. В качестве инструмента использован программный пакет ANSYS CFX 14.0, принцип действия которого основан на методе конечных объемов при неявном алгоритме интегрирования. Рассматривалось течение теплопроводного сжимаемого вязкого турбулентного газа. Для выполнения поставленной задачи использован программный пакет CAE класса, а также дополнительные турбоинструменты на базе единой рабочей платформы.

Одно из важных свойств межлопаточного течения в ступени осевого компрессора – радиальное равновесие течений по высоте межлопаточного канала. На расчетном режиме каждое сечение ориентировано по отношению к потоку оптимальным образом. Если расход воздуха изменяется, то расчетные условия нарушаются, и

местные сечения лопатки оказываются в очень разных условиях.

Моделирование показало, что на устойчивых режимах работы происходит практически бесрывное обтекание профиля. При приближении к границе устойчивости на спинке профиля возникает вращающийся срыв потока, а по высоте пера появляются линии тока. При переходе границы устойчивости возникают обратное течение воздуха (помпаж) и интенсивные радиальные течения воздуха в межлопаточном канале.

Практическую ценность результатов моделирования 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.

Результаты экспериментальных исследований

На лабораторной установке, представляющей собой ступень осевого компрессора, вращающуюся с частотой 2500 об/мин, на вход кратковременно подавался горячий воздух. Пульсации давления регистрировались за рабочим колесом (рис. 3).

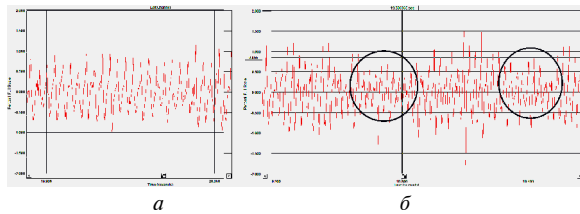


Рис. 3. Пульсации давления за рабочим колесом ступени осевого компрессора: а – устойчивая работа; б – при подаче горячего воздуха

При устойчивой работе ступени отмечаются пульсации давления с практически постоянной амплитудой с частотой прохождения рабочих лопаток. При подаче горячего воздуха появляются кратковременные уменьшения и увеличения амплитуды с частотой 9 Гц, соответствующей возникновению помпажа. При этом снижение запаса устойчивости сопровождается изменением амплитуд высших лопаточных составляющих (2-й – 5-й) относительно первой составляющей на 6...9 дБ, что подтверждает результаты исследований, приведенные в [5].

Колебания давления при срыве и помпаже, строго говоря, являются негармоническими. Тем не менее, такой колебательный процесс можно обработать с помощью скользящего БПФ, идентифицируя срывной процесс по изменению спектральных составляющих в определенных диапазонах частот (рис. 4).

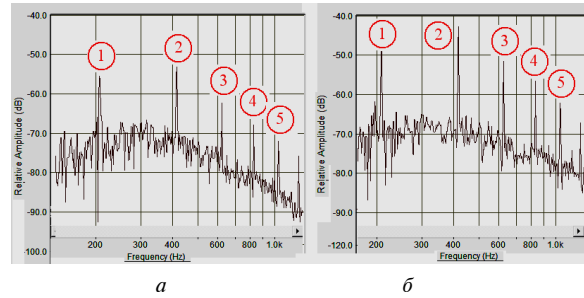


Рис. 4. Спектральное разложение сигнала пульсаций давления (номераи указаны лопаточные частоты): а – устойчивая работа; б – срывное течение

Увеличение этих составляющих может быть использовано для формирования сигнала о возникновении срыва или помпажа. Однако техническая реализация метода выявления нестационарных течений в осевом компрессоре, основанного на использовании датчиков статического давления потока для ГТД с высокими частотами вращения ротора потребует применения дорогостоящих датчиков высокочастотной пульсации статического давления потока (10...15 кГц) и соответствующей аппаратуры, позволяющей надежно регистрировать диагностическую компоненту в широкополосном пульсационном сигнале на фоне шумов от общей неравномерности потока в режиме реального времени, что является сложной технической проблемой [6].

В качестве другого источника информации можно использовать вибрации корпуса, возникающие от вращающегося срыва. Вращающийся срыв возникает на нерасчетных режимах работы компрессора и характеризуется локальным падением давления в одной или нескольких зонах проточной части компрессора (рис. 5). Это вызывает срывное обтекание рабочих лопаток и вибрацию корпуса двигателя.

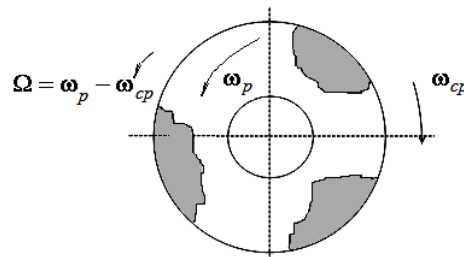


Рис. 5. Зоны возникновения вращающегося срыва

Зоны срыва движутся по окружности в направлении, противоположном направлению вращения ротора, со скоростью $\omega_{cp} < \omega_p$ (то есть относительно неподвижного наблюдателя зоны движутся в направлении вращения ротора со скоростью $\Omega = \omega_p - \omega_{cp}$).

По уровню и характеру вибрации вращающийся срыв подобен аэродинамическим вибрациям, но он происходит на низких частотах, а его частота не имеет жесткой связи с частотой вращения ротора, что дает возможность выделить частоту срыва на фоне субгармонических вибраций. Появление такой вибрации свидетельствует о возможности развития помпажа в компрессоре.

Величина скорости вращения срыва находится в диапазоне $(0,3...0,7) \omega_{рот}$ в зависимости от количества рабочих и неподвижных лопаток и относительного диаметра втулки.

Анализируя результаты численного моделирования течений в межлопаточных каналах логично предположить, что при возникновении вращающегося срыва и воздействии пульсирующего потока на корпус через радиально-упорный подшипник должны измениться параметры вибрации корпуса на частоте срыва.

Для подтверждения этого положения проведены экспериментальные исследования по измерению вибраций на электроприводной установке ТМ-01, содержащей полноразмерную ступень осевого компрессора с 20 рабочими лопатками. Частота вращения ротора составляла до 6500 об/мин. Для регистрации вибраций использован акселерометр для прецизионных измерений вибрации KD-35/92045 с коэффициентом передачи $4,9 \text{ мВ/м}\cdot\text{с}^{-2}$. Датчик устанавливался на корпусе компрессора на магнит перпендикулярно и параллельно оси вращения ротора. При креплении акселерометра магнитом обеспечивается частотный диапазон регистрации виброускорений до 4 кГц, что удовлетворяет условиям эксперимента. Вибросигнал подавался на компьютер, где записывался и обрабатывался с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Ввод компрессора в состояние неустойчивой работы производился плавным дросселированием потока заслонкой на выходе из компрессора.

Результаты эксперимента показали, что общий уровень вибросигнала в широкой полосе частот при возникновении вращающегося срыва изменяется незначительно и не может служить диагностическим признаком возникновения предпомпажного состояния. Увеличение частоты вращения при дросселировании объясняется раскруткой ротора при уменьшении расхода воздуха и нагрузки на приводной электродвигатель.

На спектрограмме четко выделяются составляющие на лопаточных частотах, уровень которых возрастает на неустойчивых режимах работы.

На рис. 6 приведены фрагменты спектров в диапазоне роторных частот при устойчивой работе компрессора и при вращающемся срыве, полученных спектральным разложением вибросигнала с датчика, установленного по оси компрессора.

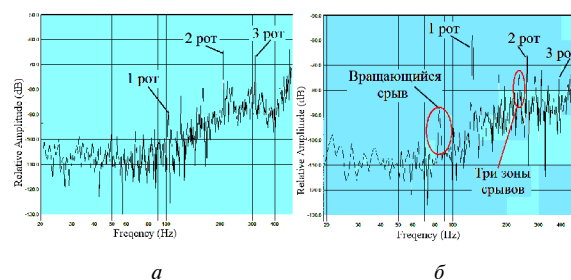


Рис. 6. Спектры вибросигналов:
а – устойчивая работа; б – вращающийся срыв

В эксперименте срывная гармоника имеет частоту приблизительно 83 Гц, что соответствует $0,65 \omega_{рот}$. Срывная гармоника является устойчивой, значительно выделяется на фоне шумов (в экспериментах – выше уровня шумов на 12 дБ), что позволяет использовать ее для диагностики вращающегося срыва.

Для небольших относительных диаметров втулки характерно возникновение нескольких зон срыва, не охватывающих по высоте весь лопаточный канал. В проведенных экспериментах выявлены три срывных зоны (рис. 6, б).

В последнее время для вторичной обработки сигнала с малоинерционных датчиков, имеющего негармоническую (срывную) форму в виде пиков используется Wavelet-преобразование. Однако, как показано в работе [3], 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 развития 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 [7], 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.

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 не-

сколько спектральных составляющих вибрации, 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, в том числе, спектральных составляющих вибрации корпуса компрессора. Сигнал, получаемый от одного источника, подтверждается (или блокируется) сигналом от другого источника иной физической природы, что исключит ложные срабатывания и повысит надежность работы противопомпажной системы.

Список литературы

1. Прокопьев А. Л. Помпаж и самовыключение (заглохание) двигателя вертолета при пуске неуправляемых авиационных ракет из блоков орудий / А. Л. Прокопьев, О. В. Поветкин // Авиационно-космическая техника и технология: Вестник Самарского гос. аэрокосм. ун-та. – 2011. – 3(27). Самара: СГАУ. – С. 257–264.
2. Неуправляемые авиационные ракеты [Электронный ресурс] / – Режим доступа: http://files.saperka.ru/lans/neupr_rakety.pdf – 1.12.2004 г. – С. 441–447.
3. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях / В. Г. Августинович, Ю. Н. Шмотин, А. П. Сипатов и др. – М. : Машиностроение, 2005. – 536 с.
4. Мохаммадсадеги Ф. Моделирование срывных и неустойчивых режимов работы ступени осевого компрессора для диагностики его предпомпажного состояния / Ф. Мохаммадсадеги // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 2. – С. 80–83.
5. Варжицкий Л. А. Исследование спектральной модели пульсаций давления в осевом компрессоре для диагностики газодинамической неустойчивости / Л. А. Варжицкий, Ю. В. Киселев, М. К. Сидоренко. – Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Сборник научных трудов. – Куйбышев : КУАИ, 1988. – С. 20–24.
6. Михайлов А. Л. Диагностика автоколебаний рабочего колеса компрессора малоразмерного ГТД [Текст] / А. Л. Михайлов, О. Л. Посадова // Контроль. Диагностика. – № 7. – 2008. – С. 47–50.
7. Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики двигунів: моногр. / Н. І. Бурау, Л. Л. Яцко, О. М. Павловський, Ю. В. Сопілка. – К. : НАУ, 2012. – 152 с.

Поступила в редакцию 11.05.2015

Чигрин В.С., Мохаммадсадегі Ф. Експериментальне дослідження нестійких режимів роботи ступені вісьового компресора

Розглянуто динаміку втрати газодинамічної стійкості ступені компресора, виконано експериментальні дослідження по виявленню інформативних критеріїв появи передпомпажного режиму. Обґрунтовано необхідність розробки і впровадження систем автоматичного регулювання попередження помпажу компресора ГТД. Сформульовано основні напрямки з розробки систем попередження помпажу компресора, головними з яких є виявлення інформативних ознак зародження помпажу і розробка автоматичних систем його попередження.

Ключові слова: нестійка робота ГТД, компресор ГТД, помпаж, обертовий зрив, система попередження помпажу.

Chigrin V., Mohammadsadeghi F. Experimental research of unstable modes of stage of axial compressor

The paper addresses the dynamics of the gas-dynamic instability of compressor stage and experimental investigations to find the intelligence criterions to detect the beginning of instable operation. The research has proved the necessity to design and implement the automatic surge-preventing systems of GTE compressors. New ways of the automatic surge-preventing systems development were proposed. The major task of the automatic surge-preventing systems is the identification of beginning of the surge.

Key words: Unstable operation of GTE, compressor of GTE, surge, rotation stall, surge preventing system.