

И.П.Канунников

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ СРЫВА В КОМПРЕССОРАХ ГТД НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

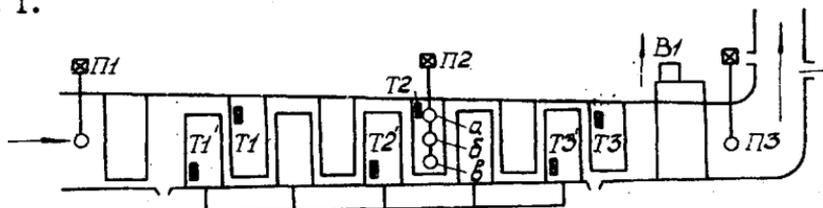
Одним из существенных факторов, ограничивающих вибрационную прочность лопаток и надежность компрессоров авиационных ГТД, является вращающийся срыв. Для обеспечения требуемой надежности изделий необходимо иметь высокоэффективную методику диагностики вращающегося срыва с целью достоверного определения областей устойчивых режимов работы, опытных характеристик вращающегося срыва и особенностей колебаний лопаток при возникновении срыва. Такая методика полезна на этапе доводки и при испытаниях полноразмерных ГТД, изолированных компрессоров и их отдельных ступеней, а также может использоваться при эксплуатации изделий (отбраковка ненадежных изделий) и при экспериментальных исследованиях срывных явлений в компрессорах.

В зависимости от решаемых задач можно условно выделить три этапа в диагностике вращающегося срыва (табл. I).

Эффективным средством виброакустической диагностики ГТД является спектральный анализ. Результаты исследований диагностических свойств спектров виброакустических процессов в компрессорах ГТД на режимах вращающегося срыва [1,2] позволили разработать методику диагностики вращающегося срыва с использованием спектрального анализа процессов.

Разработанная методика включает в себя алгоритм диагностирования, рекомендации по выбору количества, типов, мест установки измерительных преобразователей виброакустических процессов в зависимости от решаемых задач диагностики, а также рекомендации по выбору параметров и условий записи и анализа.

Обобщенная схема установки преобразователей вибропроцессов, рекомендуемых применительно к этапу доводки компрессоров, приведена на рис. I.



Р и с. I. Обобщенная схема установки измерительных преобразователей виброакустических процессов при доводке компрессоров

Т а б л и ц а I

Этапы диагностики вращающегося срыва

Этап диагностики	Содержание этапа	Цель диагноза	Применение
I	Фиксация срыва	Выявление областей неустойчивых режимов работы изделий без разделения вида срыва	Газодинамическая доводка и эксплуатация изделий (выявление опасных режимов работы, разбраковка ненадежных изделий, создание систем защиты)
II	Идентификация вращающегося срыва	Определение вращающегося срыва как явления	Газодинамическая доводка изделий (разработка мер борьбы со срывом, предварительная оценка степени опасности режима)
III	Определение параметров вращающегося срыва и особенностей колебаний лопаток	Оценка интенсивности срыва; определение локальности срыва по длине компрессора и высоте газозадушного тракта, скорости вращения срыва, вида неравномерности или числа зон, их формы и взаимного расположения; оценка значимых гармоник возбуждающих сил; определение вида колебаний лопаток и выявление резонансных режимов; прочие особенности	Газодинамическая и прочностная доводка изделий (оценка степени опасности режимов вращающегося срыва); экспериментальные исследования по изучению физики срыва (набор экспериментальных данных, исследование закономерностей проявления срыва и т.д.)

Для детального исследования особенностей проявления вращающегося срыва по всему тракту испытываемого компрессора необходима, в общем случае, постановка большого количества преобразователей пульсаций давления как по длине (в каждой ступени), так и по высоте тракта. Однако при доводочных испытаниях, учитывая, что срыв обычно локализуется на первых или последних ступенях компрессора, можно ограничиться меньшим количеством преобразователей, установленных на входе, выходе и в середине по длине тракта (преобразователи П1, П2, П3). При этом желательно замерять пульсации давления по высоте газозвдушного тракта (например, преобразователи П2,а; П2,б; П2,в).

Для исследования особенностей колебаний лопаток компрессора и оценки запасов прочности при вращающемся срыве необходимо тензометрирование лопаток по всем ступеням компрессора. Однако с целью получения информации о вращающемся срыве можно ограничиться первыми, средними и последними ступенями (преобразователи Т1, Т2, Т3, Т1', Т2', Т3').

Для проведения диагностики срыва с помощью спектров корпусной вибрации рекомендуется устанавливать вибропреобразователь в районе опоры ротора компрессора в радиальном направлении [2] (например, преобразователь В1).

Применение рассмотренной схемы установки первичных преобразователей процессов позволяет диагностировать не только срыв всего компрессора, но и вращающийся срыв, локализующийся на отдельных его ступенях и занимающий по высоте часть канала (у втулки или на периферии), а также выявить особенности проявления срыва по длине компрессора.

В зависимости от необходимой глубины диагноза можно использовать различные комбинации рекомендованных преобразователей, при этом следует учитывать выявленные диагностические свойства спектров процессов и решаемые задачи диагностики (табл. 2).

Так, например, при решении задач первого этапа диагностики можно проводить замеры одним из преобразователей пульсаций давления или вибрации. Причем для преобразователя вибрации достаточно использовать низкочастотную информацию, а для преобразователей пульсаций давления при диагностике локального срыва необходимо использовать высокочастотную информацию спектров. В противном случае преобразователи должны быть установлены непременно в месте, где срыв существует.

При выборе первичных преобразователей на третьем этапе диагностики следует учитывать следующие особенности.

Во-первых, при определении локальности срыва целесообразно использовать высокочастотную информацию в спектрах пульсаций давления или корпусной вибрации. При этом достаточно установки одного преобразователя.

Т а б л и ц а 2

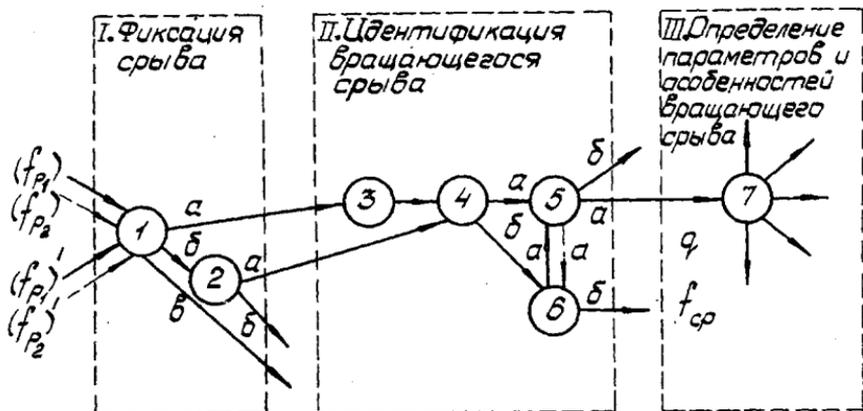
Рекомендуемые преобразователи виброакустических процессов для различных этапов диагностики

Этап диагностики	Рекомендуемые преобразователи	Примечание
I	VI или PI /И2, И3/	Используется ВЧ информация
II	VI /И1, И2, И3/ или VI /И1, И2, И3/ + + TI' /T2', T3' / или TI /T2, T3/ + + TI /T2, T3/	1. Преобразователи II и Т выбираются в зависимости от места локализации срыва 2. В общем случае используется НЧ и ВЧ информация
III	VI + PI /И2, И3, а, б, в, г/ + TI' /T2', T3' / или VI + TI /T2, T3/ + + TI' /T2', T3' /	Количество преобразователей определяется требуемой степенью детализации информации

Во-вторых, так как лопатка воспринимает сумму всех сил, действующих на нее, по одному тензометру на лопатке возможна диагностика срыва при различных его формах (полный, втулочный, на периферии) в отличие от преобразователя пульсаций давления, который в зависимости от места постановки может не чувствовать какой-либо формы вращающегося срыва. Для идентификации отмеченных выше форм вращающегося срыва необходима постановка преобразователей пульсаций давления по высоте канала.

В-третьих, детальное исследование формы срывной неравномерности, особенно имеющей сложный характер, возможно только с помощью преобразователей пульсаций давления.

Алгоритм диагностирования вращающегося срыва на основе спектрального анализа (рис. 2, табл. 3) базируется на трансформации частот в спектрограммах сигналов вращающегося и неподвижного преобразователей; на появлении при срыве спектра амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) у составляющих спектра на частотах следования лопаток компрессора; на



р и с. 2. Алгоритм диагностирования вращающегося срыва

Т а б л и ц а 3

Содержание алгоритма диагностирования по рис. 2

№ оператора	Содержание оператора	Результаты операций	Вывод	Примечание
1	2	3	4	5
1	Выявление изменений в спектрограммах	Наличие составляющих на частотах, не кратных частоте $f_p(\alpha)$ Увеличение интенсивностей составляющих на частотах $Kf_p \geq 6\text{дБ}/(\delta)$ И прочие изменения или изменений нет (β)	Срыв есть, идти к 3 Идти к 2	Спектр анализируется в НЧ и ВЧ диапазонах
2	Выделение составляющих на частотах, жестко не связанных с частотой f_p	Искомые составляющие есть (α) Искомых составляющих нет (β)	Срыва нет, конец диагностирования Срыв есть, идти к 4 Срыва нет, конец	используется синхронное (когерентное) накопление с управлением от величины f_p
3	Выявление кратных составляющих и характерных частот	Определение частот F_q и F'_q	Идти к 4	Выявляются кратности в спектре НЧ и в спектре АЧМ
4	Сравнение частот F_q и F'_q	$F_q \neq F'_q(\alpha)$ $F_q = F'_q(\delta)$	Идти к 5 Идти к 6	

Продолжение т а б л. 3

1	2	3	4	5
5	Проверка на критерий (2)	Выполняется (а) Не выполняется(б)	Идти к 7 или к 6 Явление не связано с вращающимся срывом, конец диагностирования	Оператор 6 используется для увеличения достоверности диагноза
6	Проверка на критерий (3) или (4)	выполняется (а) Не выполняется(б)	Идти к 5 Явление не связано с вращающимся срывом, конец	
7	Определение параметров и особенностей вращающегося срыва	$q, f_{cp},$ локальность, интенсивность возбуждающих сил и т.д.		Параметры определяются в зависимости от требуемой степени глубины диагноза

свойстве сохранения постоянной относительной скорости вращения срывной неравномерности при изменении частоты вращения ротора [1, 2, 3]. Последовательность операций в алгоритме диагностирования определяется получаемыми в результате анализа характеристиками спектров виброакустических процессов (особенностями вращающегося срыва).

В качестве основной входной информации при диагностировании используются спектры сигналов неподвижного и вращающегося вместе с ротором преобразователей. при исследуемой частоте вращения ротора компрессора f_{p1} (стрелки (f_{p1}) и ($f_{p'}$) на рис. 2).

Критерием идентификации вращающегося срыва как явления следует считать выполнение равенства

$$\frac{F_q + F'_q}{q} = f_p, \quad (1)$$

где F_q и F'_q - характерные значения периодических срывных частот в низкочастотной или высокочастотной (спектр АИМ) частях спектрограмм виброакустических процессов, измеряемых соответственно неподвижным и вращающимся преобразователями; q - число зон срыва.

Однако в ряде случаев значения числа зон q на начальном этапе диагностирования неизвестны ($q > 1$, срыв с идентичными и симметрично расположенными зонами). В этом случае критерием идентификации вращающегося срыва является выполнение соотношения

$$\frac{F_q + F'_q}{f_p} = q \quad (\text{целое число}). \quad (2)$$

При этом дополнительно следует принять во внимание выполнение условий:

$$F_q = F'_q; \quad f_{cp} = F_q / q = (0,2 \dots 0,7) f_p.$$

Если имеются замеры только неподвижным или вращающимся преобразователем, а также если величины F_q и F'_q равны, критерием идентификации вращающегося срыва следует считать выполнение одного из соотношений, основанных на свойстве вращающегося срыва сохранять примерно постоянным значение относительной частоты вращения срывной неравномерности при изменении частоты вращения ротора:

$$\frac{F_{q1}}{f_{p1}} = \frac{F_{q2}}{f_{p2}}; \quad (3)$$

$$\frac{F'_{q1}}{f_{p1}} = \frac{F'_{q2}}{f_{p2}}. \quad (4)$$

Критерии (3) и (4) справедливы в случае неизменной формы срыва.

Количество определяемых в результате конечного третьего этапа диагностики характеристик вращающегося срыва и параметров зависит от требуемой глубины диагноза. Параметры вращающегося срыва q и f_{cp} определяются как решения системы уравнений

$$\begin{cases} F_q = q f_{cp} \\ E'_q = q (f_p - f_{cp}) \end{cases} \quad (5)$$

по формулам

$$q = \frac{F_q + F'_q}{f_p}, \quad f_{cp} = \frac{F_q}{q}. \quad (6)$$

Эффективность разработанной методики подтверждена опытом ее практического применения [3].

Л и т е р а т у р а

1. Канунников И.П., Сидоренко М.К. Применение спектрального анализа при исследовании вращающегося срыва в компрессорах. - В сб.: Аэроупругость турбомашин. Киев: Наукова думка, 1980, с. 116-124.

2. Канунников И.И. Вибрационная диагностика вращающегося срыва в компрессорах ГТД с использованием методов спектрального анализа. - В сб.: Вопросы прикладной механики в авиационной технике. Труды I науч. конф. молодых ученых и специалистов КуАИ. Куйбышев: КуАИ, 1980, часть II, с. 155-168. Рукопись деп. в ВИНТИ 18.03.81, № 1210-81.

3. Канунников И.И., Сидоренко М.К., Стенькин Е.Д. Некоторые результаты применения спектрального анализа при исследовании вращающегося срыва и доводке компрессоров ГТД. - В сб.: УИ Всесоюзная конференция по аэроупругости турбомашин. Киев: Наукова думка, 1981, с.60-61.

УДК 627.0643-762.017

Ю.И.Кондрашов, В.М.Квасов

ГЕРМЕТИЧНОСТЬ КЛАПАННЫХ УПЛОТНЕНИЙ КРИОГЕННОЙ АРМАТУРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАРАБОТКИ

Клапанные уплотнения агрегатов управления и автоматики ДДА и ДА работают в очень сложных условиях: они подвергаются воздействию контактного давления, эрозии, коррозии, термоциклов, вибрационного и пульсационного нагружений и т.д.

Повысить несущую способность контактирующей поверхности можно на основе рекомендаций, полученных при исследовании закономерностей процессов трения и износа, напряженно-деформированного состояния уплотнителя, контактной жесткости, влияния конструктивных факторов и технологии обработки на остаточные напряжения в уплотнительных элементах, а также путем определения минимального требуемого усилия уплотнения с учетом механических воздействий.

К запорным устройствам управляемой криогенной арматуры предъявляется ряд дополнительных специфических требований, главные из которых следующие:

а) клапанные уплотнения должны работать как на жидком, так и на газообразном продукте, а также на двухфазной смеси;

б) клапанные уплотнения должны быть герметичны как при криогенных температурах, так и при температуре окружающей среды;

в) пожаро- и взрывобезопасное исполнение клапанного уплотнения должно исключать возможность воспламенения рабочих смесей в процессе его срабатывания.