

На основании выражения (13) определим АЧХ датчика с устройством коррекции

$$\left| \frac{P_2}{P_1} \right| = \frac{[1 + \bar{\omega}^2 \bar{R}^2 \bar{C}_K^2]^{1/2}}{\left\{ [1 - \bar{\omega}^2 (1 + \bar{C}_K)]^2 + \bar{\omega}^2 \bar{R}^2 \bar{C}_K^2 (1 - \bar{\omega}^2)^2 \right\}^{1/2}} \quad (14)$$

Используя критерий вида (II), можно определить  $\bar{R}$  и  $\bar{C}_K$  для заданного частотного диапазона  $\bar{\omega}_1, \dots, \bar{\omega}_2$ , а также погрешности передачи колебаний давления в датчике с корректирующим  $R-C$  контуром. Предложенный способ коррекции может быть также использован для выравнивания частотных характеристик емкостей с каналами в системах гидро- и пневмоавтоматики.

### Л и т е р а т у р а

1. Гимадиев А.Г., Шорин В.П., Санчугов В.И. Выбор длины трубопровода, реализующего акустическую нагрузку. - Изв. высш.учеб.заведений - М.: Машиностроение, 1979, № 6.

2. Богданов И.В. Устройство для измерения пульсирующего давления газа: Авт.свид. № 427252. Сп.изобрет. № 17 от 5.05.74.

УДК 621.45.452:658.562

А.А.Верченков, И.В.Канунников,  
М.К.Сидоренко, Е.Д.Стенькин

### СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ СРЫВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОМПРЕССОРОВ ГТД

Для обеспечения требуемой надежности авиационных изделий важным является создание необходимых средств диагностики неустойчивых, так называемых "срывных" режимов работы компрессоров ГТД. Эти средства могут использоваться при эксплуатации изделий, на этапе доводки и при испытаниях полноразмерных ГТД, изолированных компрессоров

и их отдельных ступеней, а также при экспериментальных исследованиях по изучению срывных явлений в компрессорах.

Известные в настоящее время устройства фиксируют, как правило, лишь один тип неустойчивости — помпак и не предназначены для диагностики такого явления как вращающийся срыв. Например, пневматические сигнализаторы используют в качестве признаков срыва характерные для помпажа явления противотока [1] или падения давления за компрессором [2]. Применение их для диагностики вращающегося срыва проблематично. Известные методы, основанные на контроле обтекания лопаток, например описанный в работе [3], в настоящее время малоисследованы и сложны в реализации.

Перспективным для диагностики срывных режимов работы компрессоров ГТД является применение электронных сигнализаторов, использующих в качестве первичного сигнала быстропеременные процессы в ГТД: пульсации давления в тракте компрессора, переменные напряжения в лопатках, механические вибрации, акустический шум. Высокая информативность вибросигналов, их быстрая, практически мгновенная реакция на изменение состояния объекта диагностирования [4] определяют потенциальное быстроедействие и надежность работы таких устройств.

Требования к устройствам диагностики срывов можно сформулировать следующим образом:

1. Надежная работа устройства, т.е. отсутствие как несрабатываний, так и ложных его срабатываний на различных режимах работы компрессоров (различные частоты вращения ротора, степень повышения давления и расход воздуха), на различных типах компрессоров, при различных видах вращающегося срыва (многозонный срыв, срыв со сложной структурой неравномерности, слабый или интенсивный срыв и т.д.).

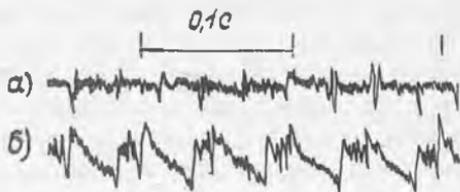
2. Требуемое быстроедействие.

3. Помехозащищенность.

4. Относительная простота реализации.

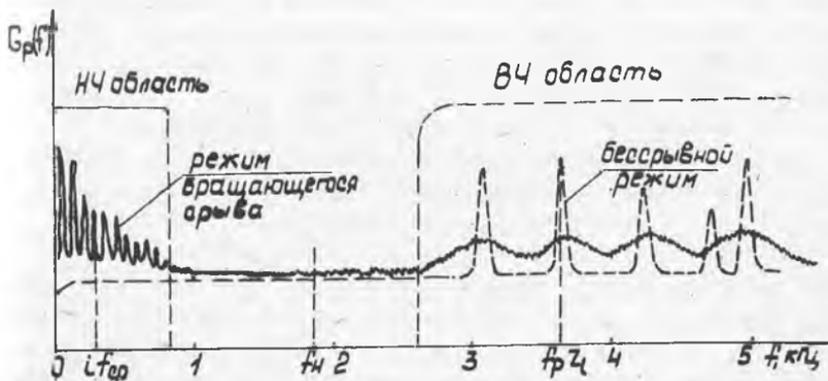
Анализ перечисленных требований к устройствам диагностики срыва показывает, что одним из основных условий их выполнимости является инвариантность признака, по которому срабатывает устройство, к интенсивности сигнала. Например, на рис. 1 приведены осциллограммы пульсаций давления, замеренные в одной и той же точке на турбоного пятиступенчатого компрессора при различных формах вращающе

гося срыва - срыва  
 слабой интенсивности  
 (частичного) и интен-  
 сивного (полного).  
 Оба эти вида срыва воз-  
 никали в компрессоре  
 при одних и тех же  
 значениях приведенных  
 оборотов ротора ком-  
 прессора и при весьма  
 близких значениях при-  
 веденных расходов воздуха и степени повышения давления. Видно, что  
 амплитуды пульсаций в этих двух случаях существенно различаются.



Р и с. 1. Осциллограммы пульсаций давлени-  
 я в тракте пятиступенчатого компресси-  
 ра при различных формах вращающегося сры-  
 ва: а - частичный срыв; б - полный срыв

Экспериментальные [5] и теоретические [6, 7] исследования  
 структуры быстропеременных процессов на бессрывных и срывных ре-  
 жимах работы компрессоров ГТД с применением методов спектрально-  
 го анализа показали, что на режимах вращающегося срыва происходит  
 существенная частотная перестройка их спектрограмм. Она проявляется,  
 в частности, в появлении интенсивных составляющих на частотах,  
 кратных частоте вращения срывной неравномерности  $f_{cp}$  (низкие час-  
 тоты) и уменьшении интенсивности составляющих на частотах следова-  
 ния лопаток рабочих колес ступеней компрессора  $f_{zл}$  (высокочастот-  
 ная часть спектрограмм).



Р и с. 2. Схематичное изменение спектрограмм пульсаций давления  
 на режимах вращающегося срыва

На рис. 2 схематично изображена характерная для вращающегося срыва перестройка спектрограмм пульсаций давления в тракте пятиступенчатого компрессора. Видно, что при вращающемся срыве изменяется соотношение интенсивностей (энергий) низкочастотной и высокочастотной составляющих спектра пульсаций давления. В соответствии с этим целесообразно при построении алгоритма работы устройства диагностики срыва использовать признаки, которые были бы чувствительны к отмеченным изменениям структуры пульсаций давления и в то же время были бы инвариантны к общей интенсивности вибросигнала. Непосредственное решение этого вопроса требует использования признака  $\Pi_1$ , определяемого как отношение интенсивностей низкочастотной ( $\Delta J_{НЧ}$ ) и высокочастотной составляющих суммарного процесса (рис. 2):  $\Pi_1 = \Delta J_{НЧ} / \Delta J_{ВЧ}$  [8]. В данном случае исключение малоинформативных частотных составляющих процесса увеличивает чувствительность признака, а безразмерность признака обеспечивает его нечувствительность к общему уровню диагностического сигнала. Однако, аппаратная реализация устройства, работающего по рассмотренному принципу весьма затруднительна. Значительно проще в аппаратной реализации способ диагностики срыва с использованием признака  $\Pi_2$ , определяемого как значение средней частоты пульсаций давления, замеренных в широком диапазоне частот -  $\bar{f}$ . Признак  $\Pi_2$ , как и предыдущий, характеризует не общую (суммарную) энергию колебаний, а соотношение интенсивностей низкочастотной и высокочастотной составляющих суммарного спектра. В этом случае алгоритм работы прибора диагностики срыва заключается в измерении средней частоты пульсаций давления и выдаче командного сигнала в случае, если значение этой средней частоты становится меньше некоторого значения, соответствующего настройке прибора ( $f_H$ ) и подбираемой экспериментальным путем для конкретного типа компрессора (рис. 3).

Один из возможных вариантов реализации устройства, работающего по изложенному алгоритму, описан в работе [9]. Указанный прибор реализован, и проведены его стендовые испытания на натуральных изолированных компрессорах двух типов - пятиступенчатом (1 тип) и трехступенчатом (2 тип). На этих компрессорах возникали различные формы вращающегося срыва, которые лимитировали границу их устойчивой работы. Испытания проводились во всем рабочем диапазоне значений приведенных оборотов роторов компрессоров ( $n_D$ ). Ввод в срыв компрессоров осуществлялся плавным изменением расхода воздуха путем регулирования выходного дросселя. Высокочастотный датчик пуль-

оаций давления, в которому подключался прибор, устанавливался непосредственно в тракте компрессора: межлопаточном канале направляющего аппарата второй ступени (для компрессора I типа) и за третьей ступенью (для компрессора 2 типа).

Из условия отсутствия ложных срабатываний прибора были выбраны оптимальные для данных типов компрессоров значения частот настройки прибора  $f_H^* \approx 600$  Гц (компрессор I типа) и  $f_H^* \approx 410$  Гц (компрессор 2 типа).

Результаты испытаний подтвердили работоспособность прибора для отмеченных выше типов компрессоров во всем диапазоне приведенных оборотов, при различных уровнях пульсаций давления в трактах компрессоров и различных формах вращающегося срыва. Типовые осциллограммы срабатываний прибора, например, для случая однозонного вращающегося срыва, возникавшего в компрессоре I типа, приведены на рис. 4.

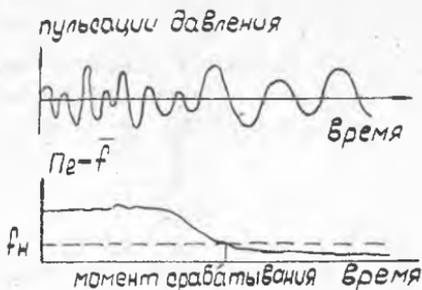
В процессе испытания были выявлены следующие особенности работы прибора:

чувствительность прибора к режимам зарождения срыва, то есть срабатывание его до наступления установившихся срывных пульсаций давления в тракте компрессора за 0,02-0,35с в зависимости от длительности переходного участка;

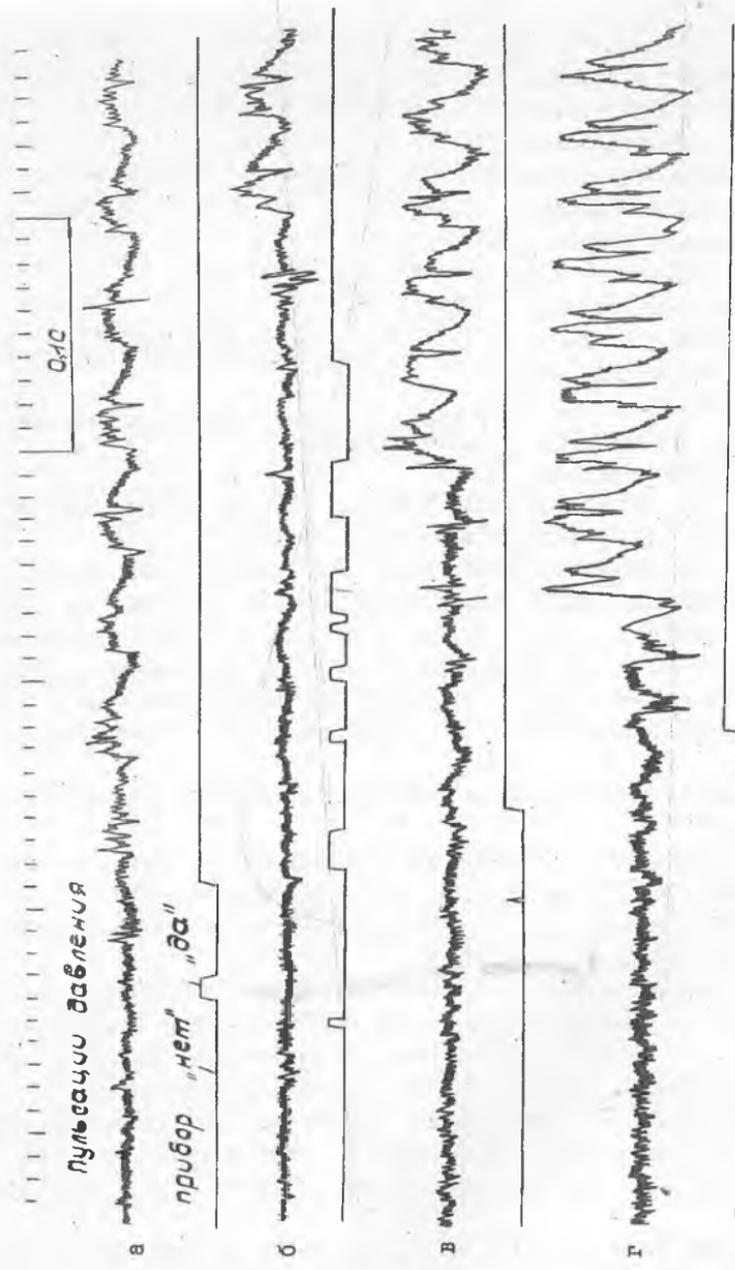
срабатывание прибора в прерывистом режиме в некоторых случаях при минимальных значениях приведенных оборотов ротора компрессора; анализ показал, что этот режим срабатывания прибора связан с характером проявления срыва и его следует считать полноценным;

появление ложных срабатываний прибора при увеличении значения частоты настройки прибора по сравнению с оптимальным значением и в первую очередь на режимах максимальных оборотов ротора компрессора;

появление более позднего срабатывания или несрабатывания прибора при уменьшении значения частоты настройки прибора по сравнению с оптимальным значением и в первую очередь на режимах минимальных оборотов ротора компрессора.



Р и с. 3. Схема, поясняющая принцип работы прибора



Р и с. 4. Осциллограммы срабатываний прибора, компрессор I типа, приведенные обороты ротора:  
 а -  $P_0 = 0,57 P_{0\text{ макс}}$ ; б -  $P_0 = 0,66 P_{0\text{ макс}}$ ; в -  $P_0 = 0,745 P_{0\text{ макс}}$ ; г -  $P_0 = P_{0\text{ макс}}$

Таким образом, результаты стендовых испытаний прибора подтвердили его высокую эффективность и, тем самым, целесообразность использования предложенного способа диагностики срыва.

### Л и т е р а т у р а

1. Г е л ь м е д о в Ф.Ш., С е м е р я к Л.И. Сигнализатор помпажа компрессора, основанный на использовании Т-образного насажда в качестве чувствительного элемента. - В сб.: Исследование в области компрессорных машин: Труды III Всесоюзной научно-технической конференции по компрессоростроению.-Казань, 1974.

2. Ф р у м к и н В.Б., М е д Г.Д. Устройство для защиты турбокомпрессора от помпажа: Авт.свид. № 214727. Бюл.изобрет.№12 от 29.03.68.

3. Система защиты от помпажа ГТД. Патент Франции № 2.131.890. Заявлен фирмой СНЕСМА 01.04.71.

4. К а р а с е в В.А., М а к с и м о в В.П., С и д о р е н к о М.К. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей.-М.: Машиностроение, 1978.

5. К а н у н н и к о в И.П., С и д о р е н к о М.К. Применение спектрального анализа при исследовании вращающегося срыва в компрессорах. - В сб.: Аэроупругость турбомашин.-Киев, 1980.

6. С и д о р е н к о М.К. Диагностические свойства аэродинамических процессов в турбомашинах. - В сб.: Физические методы исследования шумообразования и акустическая диагностика в машиностроении.-Куйбышев, 1978.

7. К а н у н н и к о в И.П. Некоторые особенности спектрального состава виброакустических процессов при срывных режимах работы компрессоров. - В сб.: Физические методы исследования шумообразования и акустическая диагностика в машиностроении.-Куйбышев, 1978.

8. Установка для оценки работоспособности механизмов и машин путем выборочного контроля их спектров вибрации. Патент США. № 3705516.

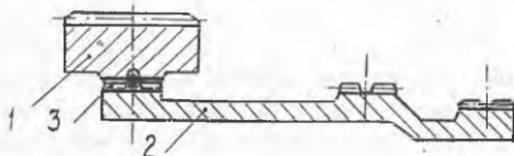
9. С и д о р е н к о М.К., С т е н ь к и н В.Д., К а н у н н и к о в И.П., Н е к р ы л о в В.Ф., К а м ы н и н Н.А., В е р ч е н о в А.А., В л а с о в П.П. Устройство для защиты газотурбинных двигателей от помпажа. Заявка на предполагаемое

УДК 621.833:534.1

В.С.Вишневецкий, М.Д.Генкин, Г.В.Тарханов

ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СМАЗОЧНЫМ СЛОЕМ  
ЗУБЧАТЫХ МУФТ

Уровни колебаний планетарных редукторов в диапазоне частот 100-1000 Гц существенно зависят от поглощения энергии зубчатыми муфтами подвесок центральных колес. В статье исследуются колебания зубчатой муфты (рис. 1), которая состоит из кольца 1 и тонкостенной обложки 2, связанных косозубым эвольвентным соединением 3 [1]. Зубья имеют шероховатости 5 мкм, а соединение смазывается турбинным маслом и нагружается в эксперименте с помощью четырех легких и податливых стяжек. Сила натяжения в стяжках контролируется с помощью тензодатчиков.



Р и с. 1. Зубчатая муфта

При колебаниях происходят микроскольжение контактных площадок соединения с амплитудами порядка  $0,01 \pm 0,5$  мкм и относительные перемещения по нормали к этим поверхностям, которые вызывают перетекание смазки в микрозазорах. Основные потери колебательной энергии в муфте обусловлены трением при микроскольжении участков контакта и вязким сопротивлением смазки.

Для оценки демпфирования в муфте исследуется модельная пара трения в диапазоне частот 70-700 Гц [2]. Экспериментальная установка состоит из стержня размером 1500 x 50 x 40 мм, который опирается на массивное основание тремя штифтами, имеющими плоские площадки. Размеры площадок, шероховатостей и величины нормального давления в контакте выбраны аналогичными зубчатым соединениям.

Колебания муфты и модельного соединения возбуждаются с помощью электродинамического вибратора, присоединяемого через пьезо-