

Разгрузочное устройство отличается компактностью, технологичностью и простотой, удобно включается в конструкции демпферов ныне существующих опор. Упругогистерезисная характеристика пакета показана на рис. 3. Разработанная методика расчета разгрузочной пружины может быть использована при решении задач о колебаниях роторов на упруго-демпфирующих опорах аналитическими и численными методами.

## Л и т е р а т у р а

1. Кондрашов Н.С. Упругофрикционные характеристики демпферов с гофрированными лентами. - В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. - Куйбышев: КуАИ, 1972, вып. 51, с. 45-61.

УДК 621.45.452 - 135.001.57

И.П. Канунников, М.К. Сидоренко, Е.Д. Стенькин

### НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ СРЫВА ПРИ ДОВОДКЕ КОМПРЕССОРОВ ГТД

Вращающийся срыв - одно из сложных и опасных явлений в компрессорах авиационных ГТД. Он существенно влияет на вибрационную прочность лопаток и надежность изделий.

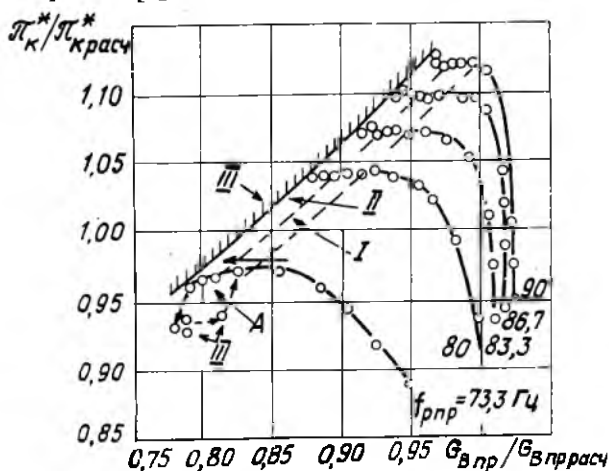
Результаты комплексных исследований структуры и диагностических свойств виброакустических процессов на режимах вращающегося срыва [1, 2] позволили разработать методику диагностики вращающегося срыва с использованием спектрального анализа процессов [3].

Разработанная методика апробировалась при испытаниях двух типов изолированных осевых компрессоров современных авиационных ГТД - пятиступенчатого (установки № 1-4) и трехступенчатого (установка № 5) - при различных сборках компрессоров по мере их доработки и доводки на к.п.д. и устойчивость. Испытуемый компрессор приводился во вращение через мультипликатор от привода газотурбинного типа. Частота вращения ротора компрессора изменялась путем изменения частоты вращения ротора привода, расход воздуха через компрессор регулировался с помощью дроссельного устройства, устанавливаемого на выходе из компрессора.

Для всех проведенных испытаний был исследован характер развития вращающегося срыва и были определены его параметры в поле напорных характеристик. С использованием разработанной методики подтверждено существование для многоступенчатых компрессоров известных ранее осо-

бенностей вращающегося срыва, таких как гистерезис, прерывистый срыв, скачкообразное изменение параметров срыва, нестабильность числа зон при многозонном вращающемся срыве и т.д.

Предельная линия срыва компрессоров определялась однозонным интенсивным вращающимся срывом всего компрессора, при котором резко уменьшалась напорность компрессора и его характеристика претерпевала разрыв (рис.1). При этом отмечался присущий вращающемуся срыву эффект гистерезиса [4].



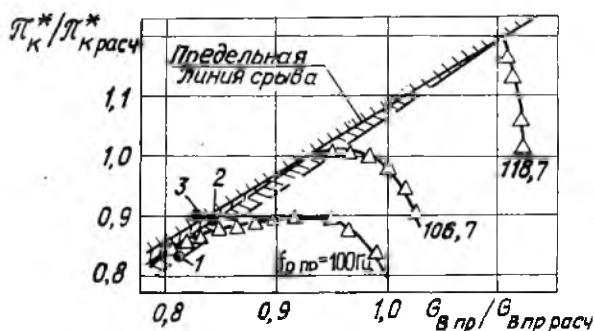
Р и с.1. Формы срыва, зафиксированные при испытании трехступенчатого компрессора (установка №5): I -  $q=1$ ,  $\bar{f}_{ср}=0,21$ ; II -  $q=2$ ,  $\bar{f}_{ср}=0,22...0,23$ ; III -  $q=1$ ,  $\bar{f}_{ср}=0,39...0,40$  (предельная линия срыва); A - эффект гистерезиса

Срывная зона занимала по высоте весь межлопаточный канал. Структура вращающегося срыва по длине компрессора не менялась. Относительная частота вращения срыва ( $\bar{f}_{ср}$ ) для одной сборки компрессоров не зависела от частоты вращения ротора ( $f_p$ ); для различныхборок эта частота менялась незначительно и лежала в пределах  $\bar{f}_{ср} = 0,33...0,37$  для пятиступенчатых компрессоров и  $\bar{f}_{ср} = 0,37...0,40$  для трехступенчатого компрессора.

В ряде случаев на установках № I - 4 при значениях частоты вращения ротора меньше расчетного значения до предельной линии срыва возникали различные формы вращающегося срыва меньшей интенсивности с  $\bar{f}_{ср} = 0,41...0,59$  и числом зон  $q = I...9$ . На установке № 5

до предельной линии срыва возникал вращающийся срыв слабой интенсивности с  $q = 1 \dots 2$  и  $\bar{f}_{ср} = 0,21 \dots 0,23$  (см. рис. 1). Переход от одной формы срыва к другой носил, как правило, скачкообразный характер.

На рис. 2 изображена напорная характеристика пятиступенчатого компрессора. В данном случае перед предельной линией срыва (область 3)

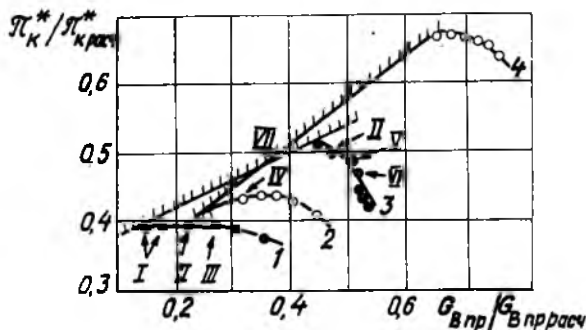


Р и с. 2. Границы срывных областей в поле напорной характеристики пятиступенчатого компрессора (установка №3)

возникал вращающийся срыв с  $\bar{f}_{ср} = 0,45$  и  $q = 6$ ; при этом зоны располагались симметрично (область 2) и несимметрично (область 1). При испытании доработанного варианта этой же установки отмеченные выше формы многозонного срыва отсутствовали. Во время испытаний доработанного варианта компрессора в установке № 3 при дополнительно прикрытых на  $10,5^\circ$  лопатках РНА по сравнению с оптимальным углом их установки до предельной линии срыва возникал вращающийся срыв с  $q = 1$  и  $\bar{f}_{ср} = 0,47$ . По мере дросселирования число зон возрастало максимум до  $q = 6$ , величина  $\bar{f}_{ср}$  оставалась примерно постоянной. Здесь же была отмечена определенная нестабильность в изменении числа зон по мере дросселирования в зависимости от скорости прикрытия дросселя. Так, в одном случае срыв последовательно был одно-, двух- и трехзонным, а затем переходил в однозонный интенсивный с  $\bar{f}_{ср} = 0,34$ ; при большей скорости прикрытия дросселя сразу возникал шестизонный срыв с  $\bar{f}_{ср} = 0,47$ , который затем также переходил в однозонный интенсивный. Вращающийся срыв с отмеченными структурами полностью пролизывал тракт компрессора и занимал по высоте весь межлопаточный канал.

В некоторых случаях устойчивым формам многозонного срыва предшествовала прерывистая (нерегулярная) форма вращающегося срыва, при которой срыв существовал в течение коротких участков времени (0,2... 0,7 с) через интервалы времени в 2 ... 5 с.

Существенное усложнение характера развития вращающегося срыва по напорным характеристикам происходило при нерасчетных углах прикрытия лопаток РНА ( $\xi_{рн\lambda}$ ) (рис.3). В этом случае срыв становился многозон-



Р и с. 3. Формы срыва, зафиксированные во время испытаний пятиступенчатого компрессора (установка № 4) при нерасчетных углах РНА: I- $q=1$ ,  $\bar{f}_{ср}=0,59$ ;

II- $q=6$ ,  $\bar{f}_{ср}=0,49$ ; III- $q=9$ ,  $\bar{f}_{ср}=0,41$ ; IV- $q=4$ ,  $\bar{f}_{ср}=0,55$ ;

V- $q=7$ ,  $\bar{f}_{ср}=0,48$ ; VI- $q=8$ ,  $\bar{f}_{ср}=0,45$ ; VII- $q=1$ ,  $\bar{f}_{ср}=0,34$ ;

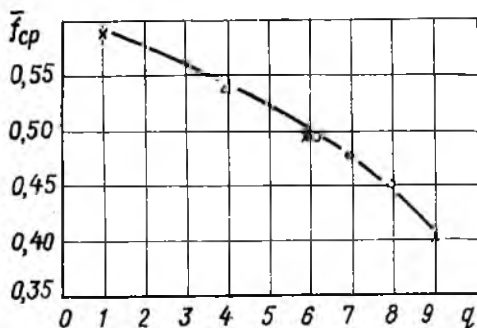
1- $\xi_{рн\lambda}=\xi_{рн\lambda}/\xi_{рн\lambda,расч}=1,97$ ;  $\bar{f}_{р,пр}=\bar{f}_{р,пр}/\bar{f}_{р,пр,расч}=0,46$ ;

2- $\xi_{рн\lambda}=0,85$ ,  $\bar{f}_{р,пр}=0,46$ ;

3- $\xi_{рн\lambda}=1,97$ ,  $\bar{f}_{р,пр}=0,77$ ; 4- $\xi_{рн\lambda}=0,85$ ,  $\bar{f}_{р,пр}=0,77$

ным причем по мере дросселирования число зон уменьшалось, а частота их вращения увеличивалась. Характерно, что для всех исследованных значений  $\xi_{рн\lambda}$  и  $f_{р,пр}$  значения величин  $\bar{f}_{ср}$  в зависимости от  $q$  ложатся на одну плавную кривую (рис. 4).

Во время одного из испытаний установки № 3 с нерасчетным углом установки РНА при  $f_{р,пр} = 83,3$  Гц ( $f_p = 83,5$  Гц) до предельной линии срыва наблюдалось резкое возрастание уровня пульсаций давления в проточной части компрессора и переменных напряжений в рабочих и направляющих лопатках. Изменения происходили во всей проточной части компрессора по ее длине и высоте межлопаточного канала. При этом наблюдалось существенное усложнение спектрального состава всех виброакустических процессов.



Р и с. 4. Зависимость величины  $\bar{f}_{cp}$  от  $q$  при нерасчетных углах РНА (установка № 4):

$$\Delta - \bar{\xi}_{pna} = 0,85, \bar{f}_{p-pr} = 0,46;$$

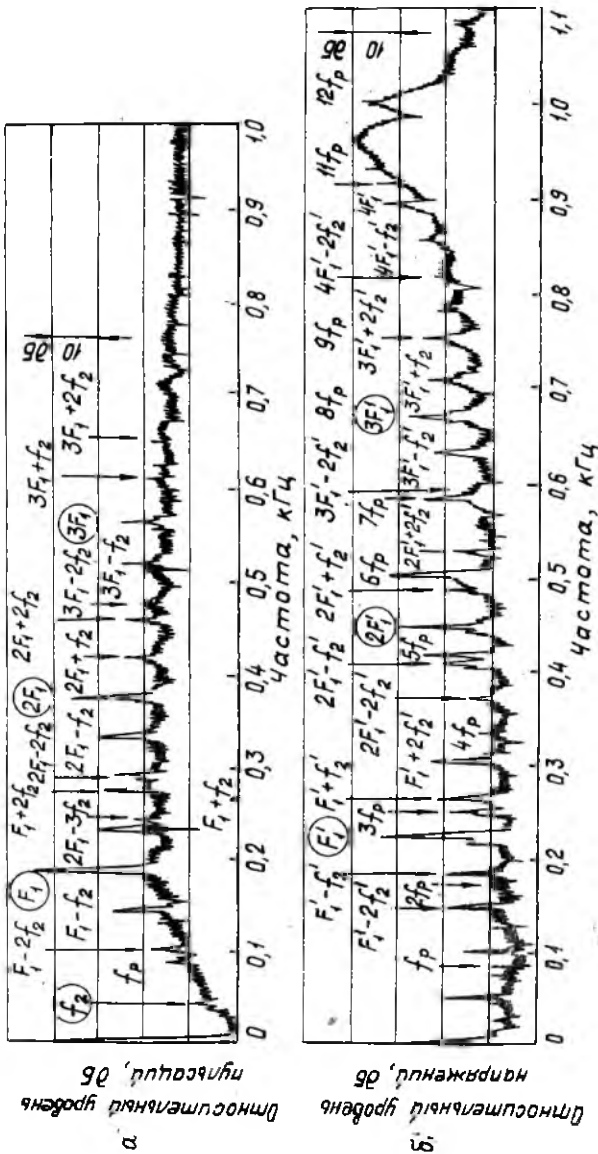
$$x - \bar{\xi}_{pna} = 1,97, \bar{f}_{p-pr} = 0,46;$$

$$o - \bar{\xi}_{pna} = 1,97, \bar{f}_{p-pr} = 0,77$$

Проведенный подробный спектральный анализ показал, что в спектрограммах процессов на этом режиме работы компрессора появляются дополнительные составляющие.

Во-первых, в спектрах сигналов неподвижных преобразователей процессов (пульсации давления, переменные напряжения в лопатках НА, вибрация) частоты наиболее интенсивных дополнительных компонент кратны частоте  $F_1 = 188$  Гц (рис. 5, а); при этом в высокочастотной части спектров вибропроцессов у составляющих на частотах следования лопаток рабочих колес ступеней компрессора появляются боковые составляющие, отстоящие вправо и влево от них также на частоту  $F_1$ . В спектрах переменных напряжений в лопатках рабочих колес ступеней компрессора частоты наиболее интенсивных компонент кратны частоте  $F_1' = 223$  Гц (рис. 5, б). Применяя разработанную методику идентификации и определения параметров вращающегося срыва, данный режим определяем как режим многозонного вращающегося срыва с числом зон  $q = 5$  и  $f_{cp1} = 37,6$  Гц ( $\bar{f}_{cp1} = 0,45$ ); при этом частота  $F_1 = q f_{cp1} = 5 \cdot 37,6$  Гц.

Во-вторых, наряду с отмеченными составляющими в спектрах присутствует ряд составляющих меньшей интенсивности: для неподвижных преобразователей — боковые составляющие у компонент на частотах, кратных частоте  $F_1$ , отстоящие вправо и влево от них на частоты, кратные частоте  $f_2 = 44$  Гц (см. рис. 5, а); для вращающихся тавто-



Р и с. 5. Спектрограммы вибропроцессов при срыве (установка № 3,  $f_p = 83,3$  Гц): а - пульсации давления на Гм РК; б - напряжение в лопатке I-го РК

метров - боковые составляющие у компонент на частотах, кратных частоте  $F_1'$ , отстоящие вправо и влево от них на частоты, кратные частоте  $f_2' = 39,5$  Гц, в некоторых случаях включая и нулевую частоту (см. рис. 5,б).

Общую формулу для частотного состава спектрограмм сигналов неподвижных вибропреобразователей в этом случае можно записать в виде

$$f_{k,i} = f_2, \quad kF_1 \pm if_2,$$

где  $F_1 = 188$  Гц;  $f_2 = 44$  Гц;  $k = 1, 2, 3$ ;  $i = 1, 2$ .

Для вращающихся тензодатчиков аналогичная формула имеет вид

$$f'_{k,i} = f_2', \quad kF_1' \pm if_2',$$

где  $F_1' = 223$  Гц;  $f_2' = 39,5$  Гц;  $k = 1, 2, 3, 4$ ;  $i = 1, 2$ .

Спектры, имеющие такой частотный состав, характерны для амплитудно-модулированных процессов с периодическими несущими с периодами  $1/F$  и  $1/F'$  и периодическими модулирующими функциями с периодами  $1/f_2$  и  $1/f_2'$  соответственно для неподвижных и вращающихся вибропреобразователей [5]. Как было показано выше, периодические несущие обусловлены пятизачасным вращающимся срывом.

Анализ показал, что периодические модулирующие функции обусловлены однозачасным вращающимся срывом с  $f_{cp2} = f_2 = 44$  Гц. ( $\bar{f}_{cp2} = 0,527$ ), так как в этом случае выполняется критерий идентификации вращающегося срыва  $\frac{f_2 + f_2'}{q} = f_p$  [3].

Из анализа следует, что в данном случае одновременно существуют две формы вращающегося срыва: первая с  $q_1 = 5$  и  $\bar{f}_{cp1} = 0,45$  и вторая, более слабая по интенсивности, с  $q_2 = 1$  и  $\bar{f}_{cp2} = 0,527$ . Причем срыв второй формы, накладываясь на первый, модулирует вибропроцессы, определяемые первой формой, по амплитуде с частотой  $f_{cp2}$  ( $f_{cp2}'$ ).

Применение спектрального анализа позволило обнаружить и исследовать неизвестное ранее явление одновременного существования двух форм вращающегося срыва с различными параметрами, сложным образом (мультипликативно) взаимодействующих друг с другом.

Таким образом, применение разработанной методики диагностики и идентификации вращающегося срыва на основе спектрального анализа подтвердило ее высокую эффективность на этапе доводки компрессоров современных ГТД и показало, что спектральный анализ позволяет получить качественно новую, более полную по сравнению с традиционными методами осциллограмми информации о вращающемся срыве и глубже разобраться в физике проявления вращающегося срыва в вибросигналах.

## 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.П. 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, ч. II, с. 155-168. Рукопись деп. в ВИНТИ 18.03.81, № 1210-81.
3. Канунников И.П. Методика диагностики вращающегося срыва в компрессорах ГТД на основе спектрального анализа виброакустических процессов. - В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов.-Куйбышев: КуАИ, 1984, с. 95-102.
4. Ершов В.Н. Неустойчивые режимы турбомашин (вращающийся срыв). М.: Машиностроение, 1966. - 180 с.
5. Харкевич А.А. Спектры и анализ. - М.: Физматгиз, 1962. -273 с.

УДК 627.0643 - 762.017

В.М.Квасов, А.Ю.Жилокас, П.И.Кондрашов, В.В.Ряпейка

### ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ КОМПОНОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРУБЧАТОЙ ФОРМЫ ПЛА ПО КРИТЕРИЮ ЖЕСТКОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

В условиях дальнейшего роста скоростей полетов значительно повышается температура рабочих и окружающих сред. В отдельных случаях она может достигать 620 ... 820 К, что требует наличия на борту хладагента.

В поисках новых видов топлив не нефтяного происхождения многие специалисты рассматривают проблему использования жидкого водорода, одного из распространенных элементов окружающей нас природы, в качестве высокоэффективного и не загрязняющего атмосферу топлива для энергосистем и транспортных двигателей, в том числе и авиационных.

Все это уже сейчас требует направить усилия научно-технических работников и конструкторов на решение ряда проблем, связанных с созданием высоконадежных криогенных агрегатов, обладающих минимальными массогабаритными характеристиками по сравнению со стендовыми агрегатами и значительным ресурсом по сравнению с агрегатами для систем космических летательных аппаратов.