

УДК 534:629.7.036.3

А.Л. МИХАЙЛОВ, О.Л. ПОСАДОВА

ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВИБРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА СТАТОРЕ ТРДД НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ АВТОКОЛЕБАНИЙ ВЕНТИЛЯТОРА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Определяющим фактором своевременной и надежной диагностики флаттера рабочих лопаток вентилятора авиационного ГТД является уровень диагностируемого сигнала, регистрируемого вибропреобразователем, установленным на корпусе. В статье рассмотрены результаты вибрографирования ТРДД на различных режимах его работы большим количеством вибропреобразователей, расположенных в различных местах корпуса компрессора низкого давления. Установлена зависимость информативности диагностического сигнала возникновения флаттера рабочих лопаток вентилятора от места расположения и ориентации вибропреобразователя. Определен механизм передачи энергии колебаний на корпус компрессора низкого давления, как при флаттере рабочего колеса, так и вибрации от неуравновешенности ротора.

газотурбинный двигатель, лопатка вентилятора, автоколебания, вибродиагностика, вибропреобразователь

Введение

Подавляющее большинство поломок рабочих лопаток осевых компрессоров авиационных ГТД имеет усталостный характер и связано с переменными напряжениями, возникающими в лопатках при колебаниях. Особый случай представляют автоколебания (АК) – нерезонансные самовозбуждающиеся (без внешних периодических воздействий) колебания лопаток с незатухающей амплитудой, поддерживаемые переменными аэродинамическими силами, возникающими при колебательном движении лопаток из-за упругих обратных связей [1]. Наиболее часто в рабочих лопатках компрессора ГТД возникают низкочастотные АК лопаток, происходящие по первым трем низшим формам колебаний – первой изгибной, первой крутильной и второй изгибной.

Все типы АК характеризуются лавинообразным ростом амплитуды вибронпряжений во всех элементах рабочего колеса ГТД (лопатках, замках, дисках и др.) до опасных значений. Поэтому повышение информативности измерения в реальном времени динамических сигналов различной природы, сопровождающих АК является важной задачей.

1. Обзор публикаций и выделение нерешенных задач

Традиционно для диагностики АК лопаток вентилятора ТРДД используют динамическое тензометрирование. Однако, сложность тензометрирования лопаток компрессора (трудоемкость препарирования и прокладки коммуникаций, наклейки тензорезисторов) привела к необходимости поиска бесконтактных методов диагностики АК, среди которых наибольшее развитие получили методы, основанные на использовании датчиков пульсаций статического давления потока, размещенных на корпусе вблизи исследуемой ступени компрессора и анализе корпусной вибрации. В [2] приведен обзор этих методов. В [3] рассмотрены метод вибродиагностики АК и механизмы передачи на корпус компрессора вибрации, генерируемой колеблющимися лопатками. Отмечено, что при возникновении АК РК возникает вперед бегущая синусоидальная волна перемещений лопаток, движущаяся относительно колеса в направлении вращения с числом узловых диаметров m и с диагностической частотой f_0 , которая превышает частоту собственных колебаний лопатки f_m на величину произведения числа узловых диаметров m на частоту вращения РК f_p .

Появление волны перемещений лопаток приводит к появлению дополнительной волны давления воздуха, которая вызывает колебания корпуса. Амплитуда этой волны в свою очередь пропорциональна амплитуде вибронпряжений в лопатках. Это предполагает наличие пропорциональной зависимости между вибронпряжениями в лопатках и вибрациями корпуса на частоте f_0 .

Возможны два механизма передачи волны перемещения лопаток на корпус (один из которых может доминировать): во-первых, механический, через диск, вал и опоры, во-вторых, аэродинамический, через поток. В обоих случаях откликом колебаний лопаток вентилятора при АК на частоте f_m являются колебания корпуса на частоте f_0 , с уровнем сигнала, зависящим от амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) корпуса, на котором установлен вибропреобразователь. Для своевременной и надежной вибродиагностики АК амплитуда этих колебаний должна превышать установленный пороговый уровень, а это, в свою очередь, зависит от места расположения и ориентации вибропреобразователя.

2. Решение проблемы. Описание технических средств, используемых при вибрографировании корпусов ГТД

Для контроля уровня вибрации в процессе стендовых испытаний и в эксплуатации используются, как правило, вибропреобразователи, устанавливаемые: на корпусе ГТД в плоскостях расположения опор роторов, в местах подвески двигателя в мотогондole самолета, на корпус подшипников. Выбор типа вибропреобразователей осуществляется с учетом их электрических и массогабаритных характеристик с целью обеспечения корректного съема информации быстропеременного процесса в конкретной точке измерения вибрации. Для измерения и контроля вибрации рассматриваемого компрессора низкого давления (рис. 1) ТРДД были использованы вибропреобразователи ведущих фирм-разработ-

чиков – «БРЮЛЬ и КЪЕР» (В&К) и «ВИБРОМЕТР». Контроль корпусной вибрации выполнялся по информации, зарегистрированной со штатных вибропреобразователей, установленных (рис. 1) в вертикальном и горизонтально-поперечном относительно оси двигателя направлении:

- на корпусе подшипника №1, Vibrometer CA-186 (поз. 4,11);
- на фланце промежуточного корпуса, В&К 7704А-50 (поз. 5, 6);
- на корпусе подшипника №3, В&К 2221F (поз. 9,10).

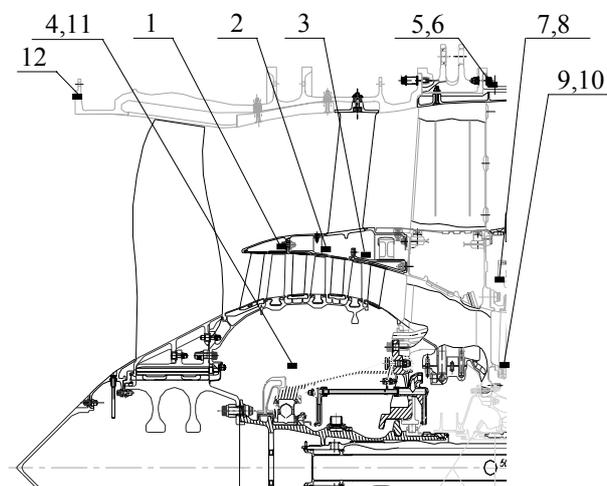


Рис. 1. Схема расположения вибропреобразователей, используемых для диагностики АК вентилятора ТРДД

Кроме штатных вибропреобразователей, по которым осуществлялся контроль вибрации ГТД, в процессе стендовых испытаний были установлены дополнительные вибропреобразователи (поз. 1, 2, 3, 7, 8) для более широкого исследования информации о вибрационных характеристиках компрессора низкого давления ТРДД при доводке двигателя.

Регистрация вибраций выполнялась как на установившихся, так и переходных режимах работы двигателя во всем диапазоне частот вращения роторов. При этом использовалась измерительная система для исследования динамических процессов DDS (Dynamic Data System) фирмы LMS (Бельгия).

Диагностика АК производилась в соответствии с методикой [4], разработанной на основе способа диагностики АК рабочего колеса турбомшины [5].

3. Результаты, полученные при исследовании корпусной вибрации при АК

На рис. 2 приведены результаты спектрального анализа вибрации в момент возникновения АК вентилятора на частоте вращения ротора каскада низкого давления $n_{нд} = 5350$ об/мин. Амплитуда вибрации при АК на частоте $f_{\delta} = 292$ Гц (при $f_m = 114$ Гц, $m = 2$, $f_p = 89$ Гц) отображена в единицах «дюйм в секунду» – ips PK (1 ips PK = 25,4 мм/с).

Анализ результатов вибрографирования показал, что среди штатных вибропреобразователей наиболее информативен вибропреобразователь Vibrometer SA-186, установленный на корпусе подшипника № 1 в вертикальном направлении (поз. 4), амплитуда виброскорости на частоте f_{δ} (292 Гц) по которому составила 5,7 мм/с (0,22 ips PK). При этом, по вибропреобразователю V&K 7704A-50, установленному на корпусе подшипника № 1 в горизонтально-поперечном направлении (поз.11), амплитуда виброскорости – составила лишь 2,4 мм/с (0,09 ips PK). По корпусу подшипника № 3, V&K 2221F (поз.9, 10) амплитуда виброскорости на частоте f_{δ} составила 2,5 – 3,2 мм/с. Вибропреобразователь V&K 7704A-50 (поз.5), установленный в вертикальном направлении на фланце промежуточного корпуса № 2 зарегистрировал в этот же момент времени амплитуду виброскорости на частоте f_{δ} равную 5,1 мм/с (0,2 ips PK). При этом амплитуда виброскорости на частоте f_{δ} по вибропреобразователю, установленному на фланце промежуточного корпуса № 2 в горизонтально-поперечном направлении (поз. б) составила 3,3 мм/с (0,13 ips PK).

Среди вибропреобразователей, установленных дополнительно для исследовательских целей вблизи источника возбуждения АК вентилятора наиболее

информативными для диагностики АК оказались вибропреобразователи, установленные в вертикальном направлении на корпусе бустера (поз. 1-3). Наиболее информативными среди них являются вибропреобразователи V&K2221D, установленные в вертикальном направлении на корпусе бустера (поз. 1). Причем, по мере удаления от источника возбуждения амплитуда виброскорости на частоте f_{δ} заметно уменьшается.

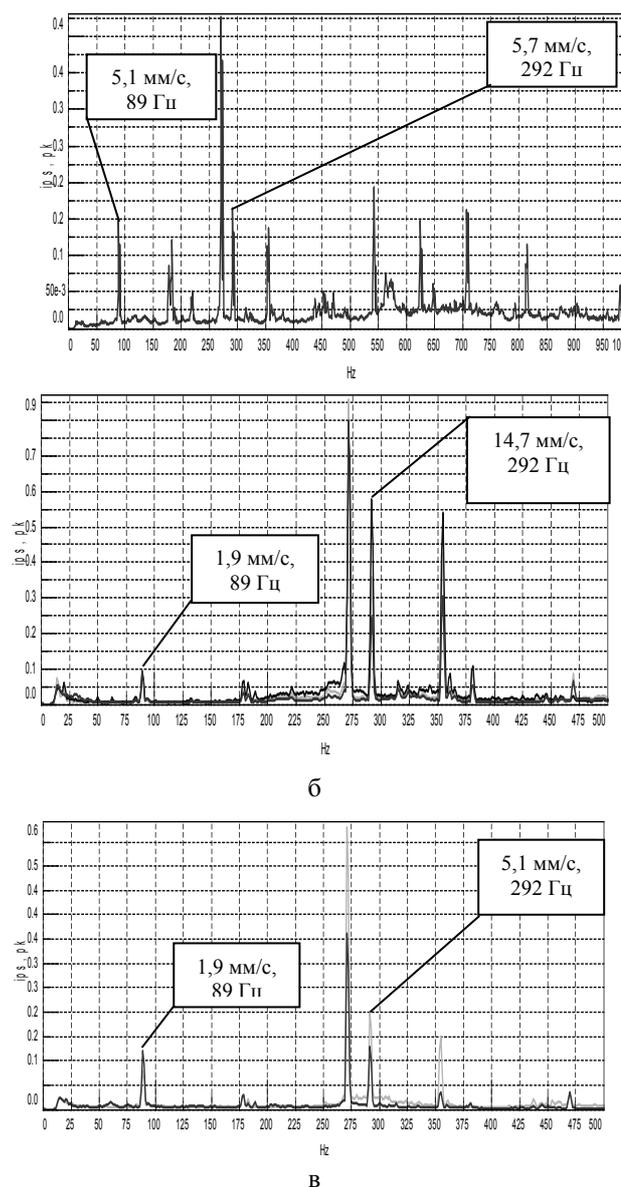


Рис. 2. Спектры вибрации при АК с вибропреобразователей, расположенных в вертикальном направлении:
а – на корпусе бустера (поз. 1);
б – на корпусе подшипника №1 (поз. 4);
в – на фланце промежуточного корпуса № 2 (поз. 5)

Если по вибропреобразователю, установленному на корпусе бустера над 1-й ступенью НА (поз.1) амплитуда виброскорости на диагностической частоте f_d составляла 14,7 мм/с (0,58 ips PK), то над 2-й ступенью НА (поз.2) – 9,1 мм/с (0,36 ips PK), а над 3-ей (поз.3) – 6,4 мм/с (0,25 ips PK). В этот же момент по вибропреобразователям В&К 7704А-50 (поз.7, 8), установленным на промежуточном корпусе амплитуда виброскорости на частоте f_d составила менее 3,2 мм/с.

Результаты спектрального анализа вибраций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты спектрального анализа вибраций

№ поз. рис. 1	Место расположения и тип вибропреобразователя в соответствии с рис. 1	Амплитуда вибрации на частоте f_d при АК, мм/с
1	Корпус бустера в районе 1 НА, вертикально, В&К 2221D	14,7
2	Корпус бустера в районе 2 НА, вертикально, В&К 2221D	9,8
3	Корпус бустера в районе 3 НА, вертикально В&К 2221D	6,4
4	Корпус подшипника № 1, вертикально, Vibrometer СА-186	5,7
5	Фланец № 2, вертикально, В&К 7704А-50	5,1
6	Фланец № 2, горизонтально, В&К 7704А-50	3,3
7	Промежуточный корпус вертикально, В&К 7704А-50	3,2
8	Промежуточный корпус горизонтально, В&К 7704А-50	3,2
9	Корпус подшипника № 3, вертикально, В&К 2221F	3,1
10	Корпус подшипника № 3, горизонтально, В&К 2221F	2,5
11	Корпус подшипника № 1, горизонтально, В&К 7704А-50	2,4

Установлено [4], что для надежного распознавания момента возникновения АК в режиме реального

времени величина амплитуды виброскорости на частоте f_d на фоне шумов, должна составлять не менее 4 мм/с.

Для вибропреобразователей (позиции 1-5), приведенных в таблице 1, справедливо следующее: уровень вибрации V_{f_d} на диагностической частоте превышает установленное пороговое значение 4 мм/с, что позволяет их использование для диагностики АК рабочего колеса вентилятора. Вибропреобразователи поз. 6-11 табл. 1, не отвечают указанным требованиям и их использование для диагностики АК менее эффективно.

Из результатов вибрографирования следует отметить, что информированность сигнала с диагностической частотой АК существенно зависит от места установки вибропреобразователя, чем ближе к источнику возбуждения, тем сигнал больше. Вибропреобразователи, установленные на корпусах в вертикальном направлении были более информативны чем установленные в горизонтально-поперечном направлении. В связи с тем, что уровень вибрации на частоте f_d по вибропреобразователям, установленным на подшипниковых опорах значительно ниже, чем на корпусах ГТД, можно предположить, что основной путь передачи энергии колебания лопаток на корпус – не механический. На аэродинамический путь передачи возбуждения указывает и информация, полученная с вибропреобразователей, установленных на корпусе бустера – вблизи источника возбуждения АК вентилятора. Характер изменения вибрации по указанным вибропреобразователям – уменьшение уровня вибрации с частотой f_d по мере удаления от источника возбуждения свидетельствует о том, что энергия от колеблющихся лопаток на корпус рассматриваемого ТРДД в основном передается потоком воздуха.

Анализ вибрации с частотой вращения ротора КНД в момент возникновения АК $f_p = 89$ Гц регистрируемой вибропреобразователями как штатными, так и дополнительными показал, что наибольшая

амплитуда виброскорости (5,1 мм/с) была зафиксирована: вибропреобразователем поз. 4 установленном на корпусе подшипника в вертикальном направлении, другие вибропреобразователи в этот же момент времени показывали: в горизонтальном направлении поз. 4 - (1,9 мм/с); поз. 5 - (1,9 мм/с) все остальные менее 3 мм/с.

Спектр роторной вибрации при штатной работе ГТД на частоте вращения ротора КНД $n = 5250$ об/мин показан на рисунке 3 (а, б и с – 1-я, 2-я и 3-я роторные гармоники КНД, d – 1-я роторная гармоника ротора КВД). Аналогичное соотношение уровня вибрации от ротора КНД наблюдается и на других режимах работы ТРДД.

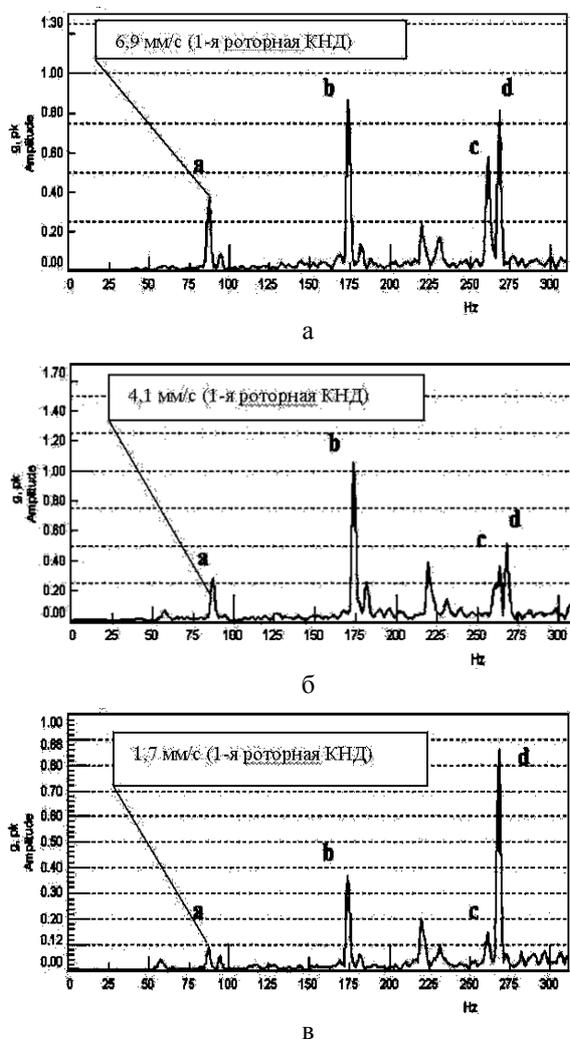


Рис. 3. Спектры роторной вибрации с вибропреобразователей, расположенных в вертикальном направлении: а – на корпусе подшипника №1 (поз. 4); б – на фланце промежуточного корпуса №1 (поз. 12); в – на фланце промежуточного корпуса № 2 (поз. 5)

Следует отметить снижение уровня вибрации по мере отдаления точки замера от места приложения возбуждающей силы, по-видимому, из-за демпфирования колебаний конструкцией деталей статора ГТД.

Выводы

В результате исследования вибрационного состояния КНД ТРДД большим количеством вибропреобразователей можно отметить:

1. Уровень вибрационного сигнала существенно зависит от места расположения вибропреобразователя.
2. Установлен механизм передачи возбуждения колебаний различной природы на корпус КНД:
 - аэродинамический при АК РК КНД;
 - механический при вибрации от неуравновешенности ротора.

Литература

1. Динамика авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
2. Михайлов А.Л., Посадова О.Л. Вибродиагностика автоколебаний рабочего колеса вентилятора ТРДД в режиме реального времени // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9(45). – С. 110-114.
3. Сачин В.М., Туманов Н.В., Шатохин А.Г. Бесконтактная вибродиагностика флаттера рабочих колес компрессоров. Аэроупругость лопаток турбомашин. Вып. 4 // Труды ЦИАМ № 1221. – С. 195-206.
4. Михайлов А.Л., Посадова О.Л. Методика вибродиагностики автоколебаний рабочего колеса вентилятора ТРДД в режиме реального времени // Сборка в машиностроении, приборостроении. – М.: Машиностроение, 2007. – № 11. – С. 30-31.
5. Патент РФ на изобретение № 2296970 Способ диагностики автоколебаний рабочего колеса турбомашин (варианты) А.Л. Михайлов, В.В. Посадов, В.В. Воинов, А.В. Фирсов, дата публ. 10.04.2007.

Поступила в редакцию 22.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук В.И. Богданов, ОАО НПО «Сатурн», Рыбинск.