

УДК 534 : 629.7.036.3

А.Л. МИХАЙЛОВ, О.Л. ПОСАДОВА

ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия

ВИБРОДИАГНОСТИКА АВТОКОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Рассмотрен новый способ диагностики автоколебаний (флаттера) рабочих лопаток вентилятора ТРДД в режиме реального времени, при котором в качестве основного диагностического признака используют спектр корпусной вибрации, что позволяет более надежно, по сравнению с известными способами, определять диагностическую частоту.

газотурбинный двигатель, лопатка вентилятора, автоколебания, вибродиагностика, режим реального времени

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 вентилятора ТРДД возникают низкочастотные АК лопаток, происходящие по первым трем низшим формам колебаний – первой изгибной, первой крутильной и второй изгибной.

В ГТД встречаются несколько типов АК лопаток компрессоров, различающихся по механизмам реализации обратных связей и режимам работы двигателя, на которых они возникают. К ним относятся срывные АК, возникающие при закритических углах атаки и происходящие в основном по первой изгибной форме колебаний; классический флаттер, обусловленный взаимодействием изгибных и крутиль-

ных форм колебаний лопаток. В эксплуатационной области режимов работы авиационных двигателей встречаются следующие типы флаттера: на рабочих лопатках – безотрывные дозвуковой и сверхзвуковой флаттер, а на лопатках спрямляющих аппаратов – флаттер запираия.

Для АК характерно наличие следующих признаков [1]: АК характеризуются резким ростом амплитуды по мере изменения режима (угла атаки, числа Маха, плотности воздуха на входе и др.); частота АК совпадает с частотой одной из низших форм собственных колебаний (большой частью с первой) и не кратна частоте вращения двигателя; колебания, как правило, возникают одновременно на всех лопатках рабочего колеса (рис. 1) и по виду близки к гармоническим (рис. 2), смотри [1].

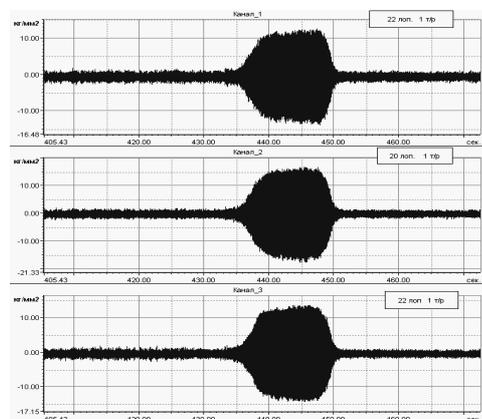


Рис. 1. Тензограммы сигналов на разных лопатках



Рис. 2. Тензограмма сигнала на одной из лопаток рабочего колеса в момент возникновения АК

Все типы АК характеризуются лавинообразным ростом амплитуды вибронапряжений (рис. 1) во всех элементах рабочего колеса ГТД (лопатках, замках, дисках и др.) до опасных значений, которые могут вызвать их быстрое разрушение, поэтому они недопустимы ни на одном из эксплуатационных режимов работы двигателя.

Все авиационные ГТД подлежат проверке на отсутствие АК, которая проводится во всем эксплуатационном диапазоне частот вращения роторов ГТД – от малого газа до максимальных в наземных и полетных условиях. В случае обнаружения АК на каком-либо из проверяемых режимов, определяют границы их возникновения и разрабатывают мероприятия по их устранению. Экспериментальная проверка эффективности мероприятий в этом случае является обязательной.

Обзор публикаций и выделение нерешенных задач. Проблеме диагностики АК посвящено множество научно-исследовательских работ как зарубежных, так и отечественных специалистов. Для диагностики АК применяют как контактные, так и бесконтактные методы их обнаружения. Известны фазоволновой и дискретно-фазовый методы.

Традиционно для диагностики АК лопаток компрессора ГТД используют динамическое тензометрирование. Однако, сложность тензометрирования лопаток компрессора (трудоемкость препарирования и прокладки коммуникаций, наклейки тензорезисторов) в ряде случаев ограничивает его применимость для диагностики АК, особенно в летных условиях на борту летающей лаборатории.

Среди бесконтактных методов обнаружения АК получили развитие методы диагностики АК, основанные на использовании датчиков пульсаций статического давления потока, размещенных на корпусе над исследуемой ступенью компрессора. В 1978 году инженеры Курков и Дикус (США), используя известное преобразование Галилея, получили формулу для частоты АК в неподвижной системе, регистрируемой датчиком пульсаций статического давления [2]:

$$f_n = f_l + mf_p, \tag{1}$$

где f_n – диагностическая частота АК лопаток в спектре пульсаций, Гц;

f_l – частота собственных колебаний лопаток при АК, Гц;

f_p – частота вращения ротора, Гц;

m – число узловых диаметров.

Среди отечественных публикаций по диагностике АК с помощью датчиков пульсаций следует отметить работы Хорикова А.А. [3], в монографии которого приведен обзор публикаций, посвященных АК, а также рассмотрен способ бесконтактной диагностики флаттера лопаток, основанный на спектральном анализе высокочастотных пульсаций давления потока по датчику пульсаций, установленному вблизи исследуемого компрессорного колеса [4].

При данном способе момент возникновения АК фиксируют по появлению в спектре пульсаций двух близких по величине компонент на частотах, равноотстоящих от составляющей на частоте следования лопаток на величину, определяемую по формуле (1).

В спектре пульсационного сигнала (рис. 3) при возникновении АК наряду с компонентами, вызванными окружной неравномерностью потока, присутствуют следующие спектральные составляющие: на диагностической частоте f_δ , на частоте следования лопаток $f_{сл}$, и две компоненты, равноотстоящие от

нее ($f_{\partial 1}$ и $f_{\partial 2}$). Частота следования лопаток f_{cl} определяется по формуле:

$$f_{cl} = n f_p, \quad (2)$$

где n – число лопаток, установленных на роторе;

f_p – частота вращения ротора, Гц.

Однако при данном способе диагностики АК компоненты диагностируют в широком частотном диапазоне вблизи частоты следования лопаток f_{cl} , кроме того, их величины соизмеримы с уровнем акустического шума и гармоник окружной неравномерности потока, свойственных рабочему процессу полноразмерного ГТД, поэтому диагностика АК в режиме реального времени по данному способу затруднительна из-за сложности выделения полезного сигнала на фоне помех в широком диапазоне частот, требуемом для анализа (рис. 3).

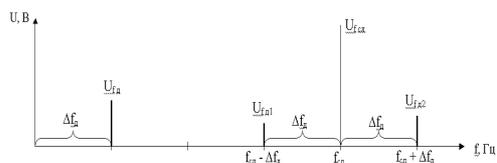


Рис. 3. Диапазон спектра пульсационного сигнала давления потока, необходимый для диагностики АК в рассмотренном случае (до 2000 Гц)

Существуют также способы диагностики АК с использованием методов статистической радиофизики. Однако они более подходят для исследования механизмов возникновения и развития АК, чем для их диагностики, т.к. реализовать их в темпе эксперимента затруднительно.

В работе Сачина В.М. [5] рассмотрен метод диагностики АК, основанный на измерении и оптимальной обработке вибрации корпуса компрессора, генерируемой колеблющимися лопатками. Однако необходимо его дальнейшее развитие с целью использования в режиме реального времени.

Формулирование проблемы исследования

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных АК, алгоритмы и технические средства надежной и своевременной их диагностики в режиме реального времени до сих пор реализованы не в полной мере. Это вызвано, прежде всего, сложностью выявления диагностических признаков, предусматривающих тщательный анализ уже зарегистрированной информации, в то время как диагностика АК важна в режиме реального времени с целью своевременного обнаружения и предотвращения усталостного разрушения лопаток компрессора ГТД.

Решение проблемы. Описание предлагаемого способа диагностики автоколебаний

В данной работе предложен способ диагностики АК вентилятора осевого компрессора ТРДД в режиме реального времени [6], при котором в качестве основного параметра для диагностики АК используют корпусную вибрацию, которую измеряют вибропреобразователями, установленными в плоскостях расположения опор роторов, и регистрируют в виде амплитудно-частотного спектра.

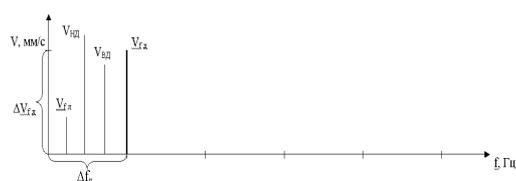


Рис. 4. Диапазон спектра вибрационного сигнала, достаточный для диагностики АК в рассмотренном случае (до 400 Гц)

Как видно из рис. 4 амплитуда виброскорости на диагностической частоте $V_{f_{\partial}}$ соизмерима с амплитудами виброскорости, генерируемыми роторами низкого $V_{нд}$ и высокого $V_{вд}$ давления, а диапазон спектра частот, необходимый для диагностики АК, значительно уже.

Определяют в этом спектре диагностическую частоту колебаний лопаток по формуле (1) и следят за ее изменением. При этом момент возникновения АК фиксируют по достижению заданного значения U_{on} отношения изменения корпусной вибрации с диагностической частотой к изменению частоты вращения ротора

$$\frac{\Delta V_{f_d}}{\Delta f_p} = U_{on} \quad (3)$$

или по достижению корпусной вибрацией с диагностической частотой V_{f_d} предельного значения, соответствующего предельному значению напряжения в лопатке,

$$V_{f_d} \sim \sigma_{пред.пл} \cdot \quad (4)$$

Дополнительно о моменте возникновения АК судят по появлению в спектре корпусной вибрации составляющей с частотой собственных колебаний лопаток V_{f_l} . Наличие в спектре корпусной вибрации этой компоненты, передаваемой с ротора на корпус двигателя через подшипниковые опоры, объясняется интенсивным возбуждением лопаток на этой частоте при АК.

При данном способе, для диагностики АК могут использоваться штатные вибропреобразователи, всегда используемые при работе ГТД, что не требует дополнительных затрат на реализацию способа.

Кроме того, при диагностике АК по корпусной вибрации частотный диапазон, необходимый для анализа, может быть значительно снижен по сравнению с известными способами диагностики, как видно из сравнения рис. 3 и 4, что упрощает техническую реализацию данного способа.

Практическая реализация предложенного способа диагностики автоколебаний

Предлагаемый способ был реализован как при испытаниях изолированной вентиляторной ступени

компрессора, так и при ее испытаниях в составе полноразмерного авиационного ТРДД.

В ходе испытаний выполняли следующие измерения. Для проведения динамического тензометрирования лопатки и диск вентилятора препарировали проволочными тензорезисторами (база 5 мм). Для диагностирования АК с помощью пульсаций статического давления потока корпус вентилятора препарировали высокочастотными датчиками пульсаций давления потока фирмы «РСВ». Для анализа по корпусной вибрации использовались вибропреобразователи МВ43-5Б.

На рис. 5 представлены примеры зависимости параметров динамических процессов (вибрационных напряжений, пульсаций давления потока, корпусной вибрации) во временной области, а на рис.6 – в частотной области.

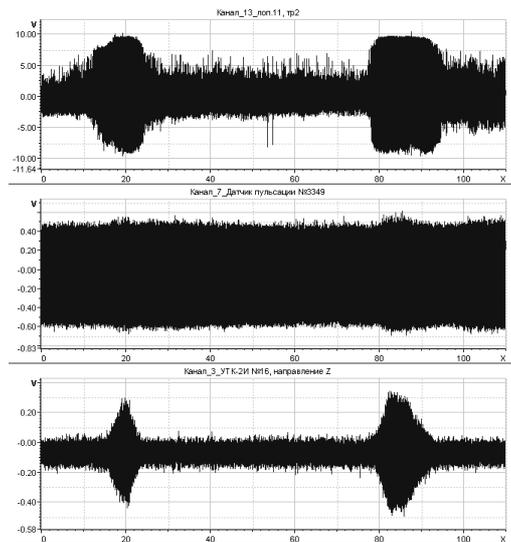


Рис .5. Графики динамических процессов во временной области с тензорезистора, датчика пульсаций давления потока и вибропреобразователя

Как видно из рис. 5 резкий рост вибрационных напряжений (верхняя зависимость) сопровождался одновременным увеличением амплитуды корпусной вибрации (нижняя зависимость). При этом, каких-либо существенных изменений по амплитуде сигнала

ла с датчика пульсаций давления потока не наблюдалось (средняя зависимость).

На рис. 6 изображены три спектрограммы динамических сигналов в момент возникновения АК.

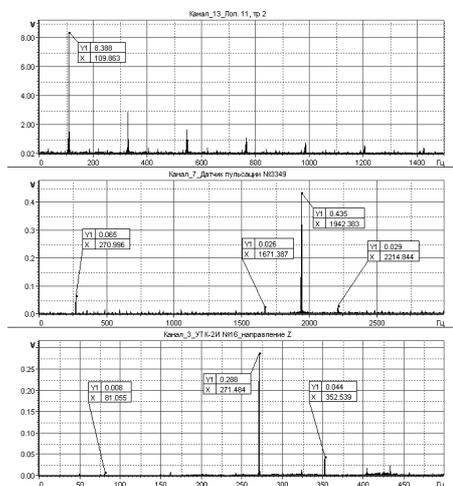


Рис. 6. Спектры сигналов с тензорезистора, датчика пульсаций давления потока и вибропреобразователя

На верхней спектрограмме показана зависимость вибрационного напряжения от частоты колебаний, где доминирует компонента на частоте основного тона колебаний (110 Гц).

На средней спектрограмме - зависимость уровня сигнала с датчика пульсаций давления потока от частоты колебаний, где доминирует составляющая с частотой следования лопаток (1942 Гц). При этом присутствуют: субгармоника с диагностической частотой (271 Гц) и две комбинационные супергармоники (1671 Гц и 2214 Гц), равноотстоящие от частоты следования лопаток вентилятора на расстояние, равное значению диагностической частоты.

На нижней спектрограмме - зависимость уровня сигнала с датчика вибраций от частоты колебаний, где доминирует компонента на диагностической частоте (271 Гц), определяемая по формуле (1).

Из рис. 5 и 6 видно, что по информативности сигнал, полученный с вибропреобразователя, не уступает сигналу, полученному с тензорезистора, значительно превышая диагностические компоненты с датчика пульсаций давления потока.

Заключение

Проведенный анализ зарегистрированной с тензорезисторов, датчиков пульсаций давления потока и вибропреобразователей информации показал преимущества предлагаемого способа диагностики АК лопаток вентилятора ТРДД в режиме реального времени, при котором в качестве основного диагностического признака используют корпусную вибрацию.

Литература

1. Динамика авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
2. Kurkov A., Dicus J. Synthesis of Blade Flutter Vibratory Patterns Using Stationary Transducers. – ASME Paper N78-GT-160. – Apr. 1978.
3. Хориков А.А. Прогнозирование и диагностика флаттера лопаток осевых компрессоров. – М.: ЦИАМ, 2002 (Тр. ЦИАМ № 1311).
4. Патент РФ на изобретение № 2111469 Способ диагностики колебаний рабочего колеса турбомашин. А.А. Хориков, дата публ. 20.05.1998.
5. Сачин В.М., Туманов Н.В., Шатохин А.Г. Бесконтактная вибродиагностика флаттера рабочих колес компрессоров // Аэроупругость лопаток турбомашин. – М.: ЦИАМ. – Вып. 4. – С. 195-206 (Тр. ЦИАМ № 1221).
6. 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 28.05.2007

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