

УДК 621.51.226.2.53

А.А. ХОРИКОВ, С.Ю. ДАНИЛКИН, В.А. ТЕЛЕШЕВ

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия***ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ОБЛЕДЕНЕНИЯ**

Приведены результаты экспериментальных исследований колебаний лопаток вентилятора авиационного двигателя бесконтактным методом на специализированном стенде при имитации обледенения в полетных условиях. На основе сопоставления результатов спектрального анализа вибрационных характеристик двигателя без обледенения и в процессе обледенения показано, что при обледенении снижается устойчивость рабочих лопаток вентилятора к флаттеру. Поэтому типовые стендовые испытания авиационных двигателей на отсутствие флаттера лопаток вентилятора рекомендуется дополнить испытаниями с имитацией условий обледенения. Применительно к таким испытаниям следует модернизировать существующие системы диагностики аэроупругих процессов.

Ключевые слова: обледенение, флаттер, рабочие лопатки, диагностика колебаний, спектральный анализ.

Введение

Согласно АП-33-2004 [1] авиационный двигатель в условиях обледенения не должен допускать снижения мощности или тяги ниже определенной величины и повышения общих вибраций двигателя более величины, указанной в Руководстве по эксплуатации. Однако, образующиеся при этом ледяные наросты на лопатках вентилятора не только снижают эксплуатационные характеристики двигателя, но и изменяют вибрационные характеристики самих лопаток, причем суммарный уровень общих вибраций двигателя может оставаться в допустимых пределах. В данной статье представлены результаты исследования аэроупругих процессов, которые возникают при обледенении авиационного двигателя. Особое внимание уделено бесконтактной диагностике возникающих при этом колебаний рабочих лопаток вентилятора. Объектом исследования являлся экспериментальный двухвальный ТРДД с одноступенчатым вентилятором, широкохордовые лопатки которого были выполнены из титанового сплава. Исследование проведено на специализированном стенде ЦИАМ, позволяющем имитировать обледенение в соответствии с нормативными документами [2].

1. Методические вопросы исследования

Очевидно, что процессу обледенения в первую очередь должны быть подвержены невращающиеся части вентилятора или вращающиеся с относительно невысокими скоростями. Такими частями в первую очередь являются лопатки спрямляющего аппарата

и корневые профили рабочих лопаток вентилятора. Обледенение лопаток спрямляющего аппарата (рис. 1) может и не вызвать колебания этих лопаток, но неизбежно вызовет дросселирование рабочего колеса вентилятора, в результате чего увеличатся углы атаки рабочих лопаток. В зависимости от упруго-массовых характеристик лопаток это может вызвать либо вращающийся срыв, либо флаттер.



Рис. 1. Нарастание льда на спрямляющем аппарате вентилятора при испытаниях на обледенение (фото со стробоскопической видеокамеры)

Традиционно основным методом исследования аэроупругих колебаний лопаток является их тензометрирование. Однако в условиях обледенения этот метод не может быть использован, так как тензометры на лопатках и средства передачи сигналов с лопаток на регистрирующую аппаратуру искажают реальную картину обледенения. Поэтому для данного исследования был предложен способ бесконтакт-

ной диагностики аэроупругих колебаний лопаток по сигналам с датчиков вибраций, установленным на корпусе вентилятора. Способ базируется на математическом соотношении, впервые изложенном в работе [3], согласно которому диагностическим признаком, позволяющим определить момент возникновения флаттера или вращающегося срыва, является наличие в спектре вибраций диагностической составляющей с частотой

$$f_d = mf_p \pm f_l,$$

где f_p – частота вращения ротора, f_l – частота колебаний лопаток, m – количество волн деформаций по окружности колеса.

В соответствии с этим способом диагностики, объект исследования был препарирован векторными виброакселерометрами фирмы «Рэм-вибро», которые позволяли измерять вибрации в трех направлениях одновременно в одной точке (рис. 2).

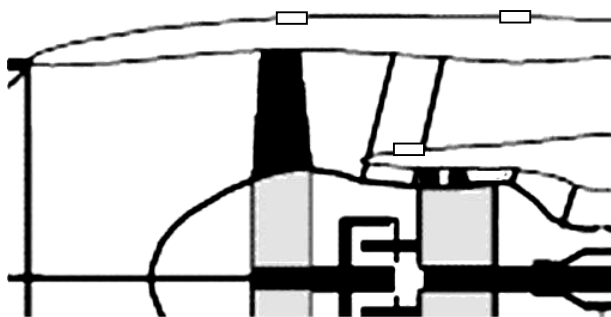


Рис. 2. Схема препарирования для диагностики аэроупругих процессов при исследовании на обледенение: □ - трехкомпонентные (векторные) вибродатчики фирмы "РЭМ-вибро"

Для определения склонности рабочих лопаток вентилятора к флаттеру и вращающемуся срыву, а также для повышения надежности диагностики были проведены предварительные исследования двигателя с вибрографированием и с тензометрированием лопаток в атмосферных условиях в отсутствии обледенения при смещенных линиях рабочих режимов. В результате этого исследования было установлено, что при смещении линии рабочих режимов на $\delta K_y \geq 4\%$ на частотах вращения $\bar{n} = 0,72..0,82$ возникает флаттер по первой форме колебаний лопаток с частотами $f_l = 106..115$ Гц. Этим частотам, зафиксированным по сигналам с тензодатчиков на лопатках, в спектре сигналов с вибродатчиков соответствовало повышение уровня вибраций на диагностических частотах $f_d = f_l + m f_p$, где $m = 2,3,4$. Между уровнем сигналов с тензометров на частоте колебаний лопаток и уровнем вибраций на диагностических частотах существовала линейная связь. Диагностических признаков вращающегося срыва обнаружено не было.

2. Результаты исследований

При экспериментальных исследованиях работы вентилятора в процессе обледенения также было зафиксировано повышение уровня вибраций, что послужило основанием для проведения их подробного спектрального анализа. На осциллограммах с датчиков вибраций (рис. 3) отчетливо видно, что вплоть до момента резкого увеличения оборотов согласно принятой методике проверки двигателя при обледенении, уровень вибраций незначителен и присут-

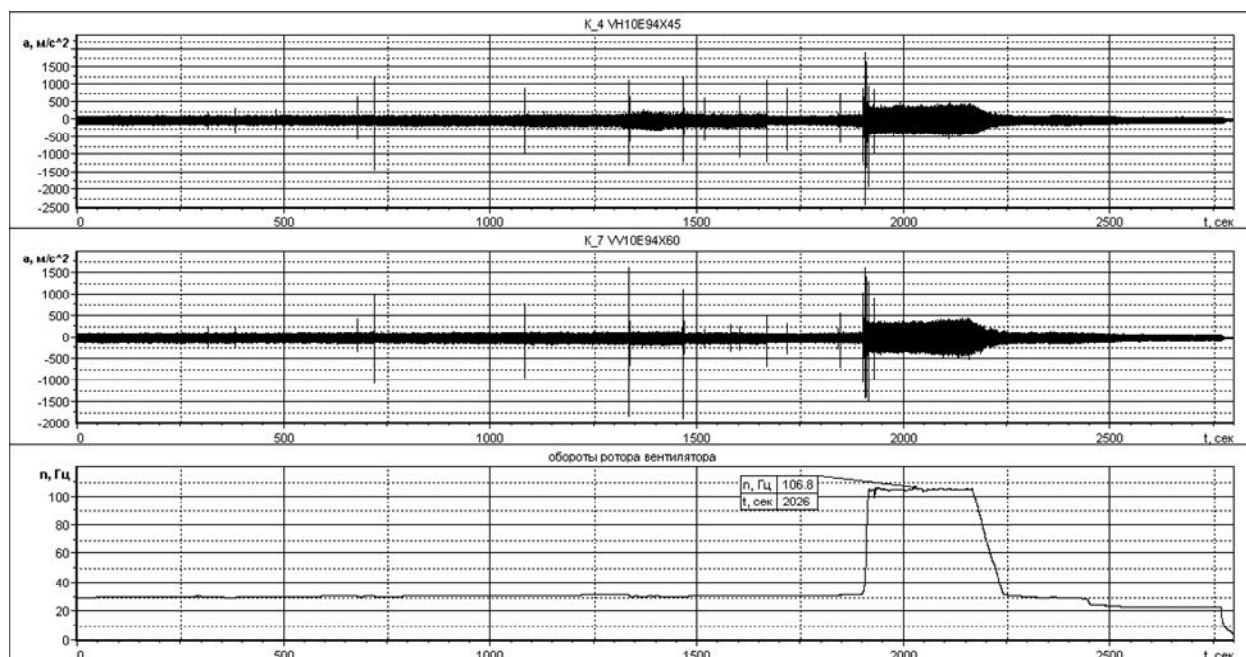


Рис. 3. Осциллограммы вибраций и изменение частоты вращения ротора при испытаниях на обледенение

ствуют лишь кратковременные всплески вибраций, которые имеют случайный характер как результат ударного воздействия на корпус при сбросе льда с рабочих лопаток вентилятора в это время. Но на максимальных частотах вращения появляются стабильные вибрации с суммарным уровнем виброускорения до $a = 400 \text{ м/с}^2$, причем этот уровень со временем даже несколько повышается. При этом кратковременные всплески вибраций присутствуют только в начальный период, а затем в течение всего времени нахождения двигателя на максимальных частотах вращения ($t = 24$ секунды) эти всплески отсутствуют, что свидетельствует об отсутствии эффекта сбрасывания льда с рабочих лопаток. Такой длительный интервал времени пребывания двигателя на максимальной частоте вращения позволил выполнить достоверный спектральный ана-

лиз вибраций методом Фурье.

Из спектров, представленных на рис. 4 при частоте вращения $\bar{n} = 0,972$ (которая была определена по спектральной составляющей на частоте следования лопаток вентилятора и ее делением на количество лопаток), отчетливо видно кроме роторных гармоник превалирование спектральных составляющих с частотами: 361,7; 467,2; 572,7 Гц, а также с частотами 618,8; 723,4; 828,9 Гц.

Нетрудно заметить, что значения этих частот отличаются точно на частоту вращения ротора, как это имело место при флаттере лопаток с указанными выше диаметрными формами колебаний $m = 2, 3, 4$ без обледенения.

Значения этих спектральных составляющих значительно превышают уровень первой роторной гармоники.

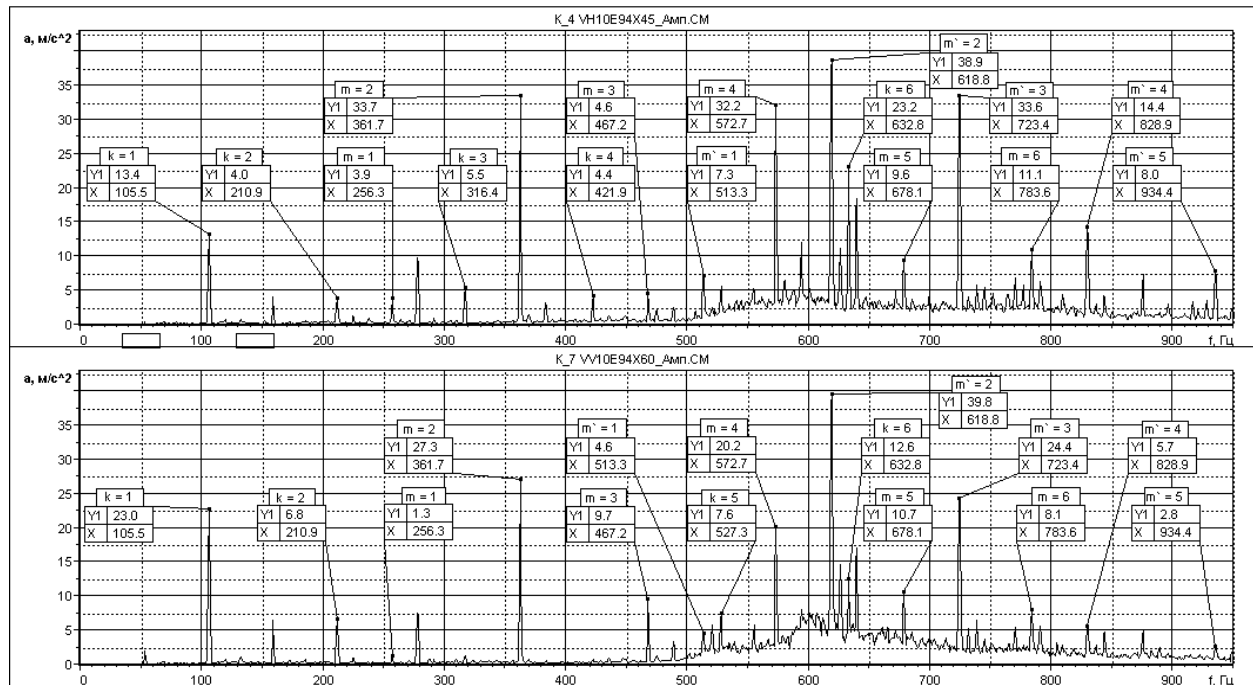


Рис. 4. Спектры вибрации при обледенении для вибродатчиков VV10E94×45 и VV10E94×60 при $\bar{n} = 0,972$ ($t = 2144\text{--}2163\text{с}$)

Если продолжить эти две последовательности частот в сторону их уменьшения, то при $m = 0$ имеющиеся в спектре вибраций минимальные значения для этих последовательностей будут равны соответственно $f_1 = 150,8 \text{ Гц}$ и $f_2 = 406 \text{ Гц}$. Расчетные значения частот колебаний лопаток при частоте вращения $\bar{n} = 0,972$ по первой изгибной и по первой крутильной формам колебаний при отсутствии обледенения равны соответственно $f_{1\text{расч}} = 123 \text{ Гц}$ и $f_{2\text{расч}} = 378 \text{ Гц}$ (см. рис. 5). Поскольку демпфирующая уплотнительная резиновая вставка, осуществляющая мягкий контакт между лопатками по аэродинамическим полкам (платформам) при положи-

тельных температурах, в процессе обледенения должна была затвердеть, вследствие чего по этим полкам появилась дополнительная «опора», то расчетные значения частот по изгибной и крутильной формам увеличатся. В предположении этого дополнительного опирания они будут соответственно равны $f'_{1\text{расч}} = 143 \text{ Гц}$ и $f'_{2\text{расч}} = 420 \text{ Гц}$ (рис. 5), что весьма близко к экспериментально определенным по датчикам вибраций значениям $f_1 = 150,8 \text{ Гц}$ и $f_2 = 406 \text{ Гц}$. Коррективы в значения частот может внести также некоторое наличие льда в корневой части рабочих лопаток, которое при этом наблюдалось визуально. Тогда перечисленным выше спектральным

составляющим вибраций с частотами 361,7; 467,2; 572,7 Гц можно привести в соответствие колебания лопаток по первой форме колебаний с числом узловых диаметров $m = 2, 3, 4$, а частотам 618,8; 723,4; 828,9 Гц колебания по крутильной форме с тем же числом узловых диаметров $m' = 2, 3, 4$ (см. рис. 4). Таким образом, в процессе обледенения на максимальных частотах вращения в спектре вибраций обнаружены диагностические спектральные составляющие флаттера, аналогичные тем, которые были обнаружены на промежуточных частотах вращения при смещении линий рабочих режимов.

Представляет несомненный практический интерес оценка уровня вибрационных напряжений в рабочих лопатках вентилятора, которым соответствуют эти вибрации. Как уже указывалось ранее, при исследовании вентилятора на флаттер была выявлена линейная связь между уровнем напряжений в

лопатках и вибрациями корпуса на диагностических частотах. При этом максимально замеренному уровню напряжений по первой форме колебаний $\sigma = 92$ МПа соответствовал уровень вибраций $a = 1g = 9,8$ м/с². Тогда уровню вибраций $a = 33,7$ м/с², замеренному в условиях обледенения для числа узловых диаметров $m = 2$ (см. рис. 5), должен соответствовать уровень вибрационных напряжений в рабочих лопатках вентилятора $\sigma = 316$ МПа, что примерно соответствует пределу усталости и, следовательно, является весьма опасным при длительной работе вентилятора.

Причиной возникновения таких опасных колебаний рабочих лопаток вентилятора может быть дросселирование вентилятора по выходу по напорным характеристикам или по входу, осуществляемое нарастанием льда на лопатках спрямляющего аппарата или на деталях входа в вентилятор.

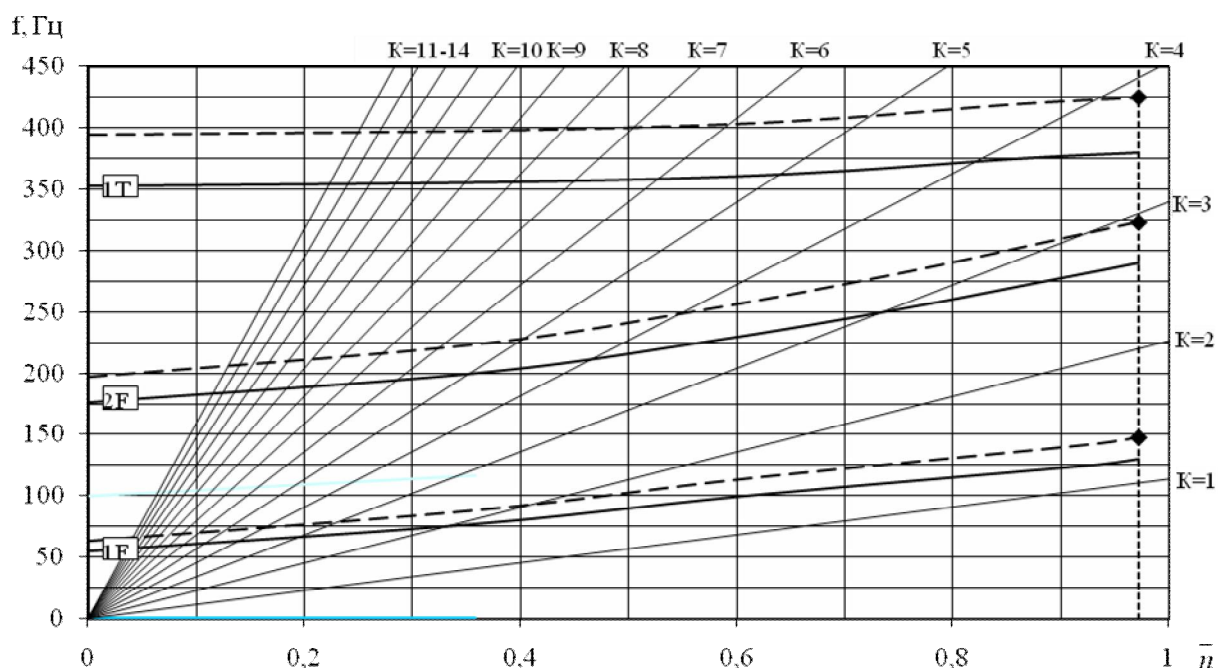


Рис. 5. Частотная диаграмма колебаний лопаток:

— при отсутствии обледенения;
 --- при наличии обледенения

При испытаниях вентилятора на флаттер без обледенения превалировала форма колебаний колеса с $m = 2$. Как видно из рис. 4 при испытаниях с обледенением в спектре вибраций на максимальной частоте вращения превалирует спектральная составляющая с $f = 362$ Гц, соответствующая форме колебаний колеса с количеством узловых диаметров $m = 2$. Так как преобразование Фурье на режиме приемистости некорректно, то для того чтобы определить частоту вращения ротора, при которой впервые появилась и стала увеличиваться по амплитуде

эта спектральная составляющая, была проведена фильтрация сигнала с датчиков вибраций в диапазоне частот $f = 300 \dots 370$ Гц, которая соответствует возможному изменению этой диагностической спектральной составляющей в диапазоне частоты вращения $\bar{n} = 0,74 \dots 1$. Результаты этой фильтрации представлены на рис. 6. Видно, что начиная с частоты вращения $\bar{n} = 0,74$ амплитуда этой спектральной составляющей начинает увеличиваться и при увеличении частоты вращения до $\bar{n} = 0,79$ через время $\Delta t = 0,7$ секунды увеличивается по одному вибродат-

чику в ~ 10 раз, а по другому вибродатчику в ~ 7 раз. Такое резкое увеличение амплитуды характерно для явления флаттера. Заметим также, что частота вращения $\bar{n} = 0,74$, с которой началось такое резкое

увеличение этой спектральной составляющей, находится в диапазоне указанной ранее частоты вращения $\bar{n} = 0,72..0,82$, в котором реализовался флаттер при отсутствии обледенения с $\delta K_u = 4\%$.

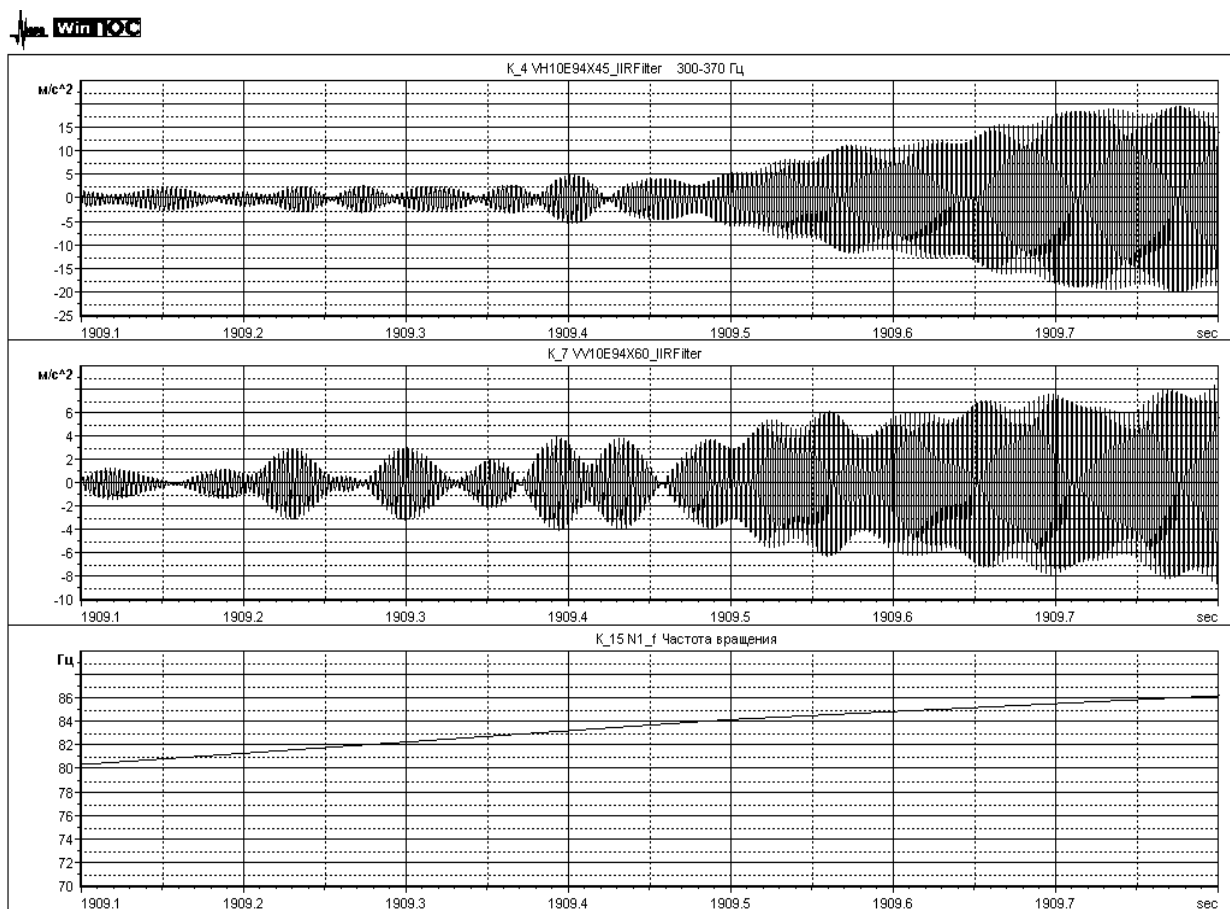


Рис. 6. Осциллограммы вибраций, отфильтрованные в диапазоне частот $f = 300-370$ Гц и изменение частоты вращения в интервале времени $t = 1909,1 - 1909,8$ сек

Заключение

Разработанная в ЦИАМ технология бесконтактной диагностики колебаний лопаток позволила провести первый этап экспериментальных исследований колебаний рабочих лопаток вентилятора в условиях обледенения. Установлено, что в процессе обледенения в рабочем диапазоне частот вращения вентилятора в спектре вибраций обнаружен высокий уровень диагностических спектральных составляющих, свидетельствующих о возникновении флаттера. Вероятной причиной возникновения таких опасных колебаний рабочих лопаток вентилятора является дросселирование вентилятора из-за нарастания льда на лопатках спрямляющего аппарата или на входных деталях вентилятора. На основе сопоставления с результатами предварительных испытаний рабочего колеса вентилятора на флаттер показано, что уровень вибрационных напряжений в лопатках, соответствующий замеренному при обледенении

уровню диагностических составляющих в спектре вибраций, близок к пределу усталости. Поэтому типовые стендовые испытания авиационных двигателей на отсутствие флаттера лопаток следует дополнить испытаниями с имитацией условий обледенения и уже по результатам этих испытаний судить об отсутствии флаттера в эксплуатационных условиях. Очевидно, что для таких испытаний необходимо модернизировать существующие системы диагностики аэроупругих процессов на основе измерения пространственно-временных и фазо-частотных параметров векторными виброакселерометрами.

Литература

1. Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. МАК, 2004г.
2. Гельмедов Ф.Ш. Методические вопросы проведения испытаний авиационных двигателей в

условиях обледенения и оценка изменения характеристик ТРДД / Ф.Ш. Гельмедов, А.В. Горячев и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – №7(54). – С. 133-138.

3. Kurkov A. Syn-thesis of Blade Flutter Vibratory Patterns using Stationary Transducers / A. Kurkov, J. Dicus // *ASME Publ.* – 1978. – NGT-160. – P. 121-127.

Поступила в редакцию 1.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, начальник отдела Е.Д. Свердлов, ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», Москва.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО СТАНУ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА В УМОВАХ ОБМЕРЗАННЯ

А.О. Хоріков, С.Ю. Данілкин, В.А. Телешев

Приведені результати експериментальних досліджень коливань лопаток вентилятора авіаційного двигуна безконтактним методом на спеціалізованому стенді при імітації обмерзання в польотних умовах. На основі зіставлення результатів спектрального аналізу вібраційних характеристик двигуна без обмерзання і в процесі обмерзання показано, що при обмерзанні знижується стійкість робочих лопаток вентилятора до флаттеру. Тому типові стендові випробування авіаційних двигунів на відсутність флаттеру лопаток вентилятора рекомендується доповнити випробуваннями з імітацією умов обмерзання. Стосовно таких випробувань слід модернізувати існуючі системи діагностики аеропружних процесів.

Ключові слова: обмерзання, флаттер, робочі лопатки, діагностика коливань, спектральний аналіз.

RESEARCH OF THE AIRCRAFT ENGINE FAN BLADES VIBRATION STATE IN THE ICING CONDITIONS

A.A. Khorikov, S.Y. Danilkin, V.A. Teleshev

Results of the aircraft engine fan blades fluctuations experimental researches by a contactless method at the specialized stand are resulted at imitation of an icing in flight conditions. On the basis of the engine vibrating characteristics spectral analysis results comparison without an icing and during an icing it is shown, that at an icing stability of the fan blades to a flutter is reduced. Therefore, standard bench testing aircraft engines for the lack flutter of the fan rotor blades recommended to supplement the tests with simulated icing conditions. With reference to such tests it is necessary to modernize existing aeroelastic processes diagnostics systems.

Key words: icing, flutter, rotor blades, vibration diagnostics, spectral analysis.

Хориков Анатолий Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, начальник отдела, ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», Москва, e-mail: khorikov@rtc.ciam.ru.

Данилкин Сергей Юрьевич – начальник сектора, ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», Москва, e-mail: danilkin@rtc.ciam.ru.

Телешев Виктор Анатольевич – инженер 1-й категории, ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», Москва, e-mail: danilkin@rtc.ciam.ru.