

И. В. ВОЙТЕНКО*ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина***ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КОНТРОЛЬ НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГТД ПО СИГНАЛАМ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ**

Обеспечения надежной и своевременной диагностики и контроля вращающегося срыва и автоколебаний на рабочих лопатках вентилятора и первых ступенях компрессоров ГТД авиационного и наземного применения при специальных стендовых испытаниях, на стадии доводки двигателя, является актуальной темой. Для решения вопроса выполнен спектральный анализ сигналов датчиков вибрации, стендовой системы контроля, зарегистрированных при проверке двигателя на неустойчивые режимы работы. Выявлены диагностические составляющие, появляющиеся в сигналах датчиков вибрации при вращающемся срыве и автоколебаниях в моменты появления напряжений на лопаточных составляющих сигналов тензодатчиков. Определено существование зависимости лопаточной составляющей и диагностических составляющих от частоты вращения ротора. Полученная зависимость дает возможность выделить из широкополосного сигнала диагностические составляющие подобно построению вибраций по первым роторным гармоникам. Проработана методика контроля вращающегося срыва и автоколебаний в процессе испытаний ГТД, с назначенными предельными уровнями, пропорциональными уровням напряжений на лопатках вентилятора. Показано, что наилучшим, с точки зрения простоты реализации и экономичности, способом контроля неустойчивых режимов работы является метод с применением следящих фильтров на диагностических частотах. При этом технически проще использовать имеющиеся датчики вибрации, применяемые при контроле первых роторных гармоник, чем устанавливать дополнительные датчики пульсации, выполняя доработки в конструкции двигателя, не упоминая о комплексе работ, необходимых для проведения тензометрирования. К тому же комплекс сигналов штатных и технологических датчиков вибрации стендового контроля позволяет определить диагностические частоты любого элемента конструкции двигателя: вентилятора, компрессора, турбины. После настройки вибрационной аппаратуры, на необходимые диагностические частоты, вести контроль может специалист без навыков по диагностике вибрационных сигналов, что удобно при первых опробованиях двигателя в эксплуатации, где контроль в полете ведет экспериментатор.

Ключевые слова: датчик вибрации; вращающийся срыв; автоколебания; следящий фильтр.

Введение

При доводке рабочих колес вентилятора, компрессора, на отладке линии рабочих режимов двигателя, проводится проверка на отсутствие неустойчивых режимов работы ГТД. Основными источниками неустойчивых режимов работы являются вращающийся срыв (ВС) и автоколебания лопаток (АК).

ВС – по уровню и характеру вибрации подобен аэродинамическим вибрациям, но он происходит на низких частотах – $0,3 \dots 0,7 f_b$, в зависимости от количества рабочих и спрямляющих лопаток и относительного диаметра втулки колеса вентилятора. [1].

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. Наиболее часто встречающимся видом аэроупругих колебаний яв-

ляются низкочастотные АК (флаттер) лопаток вентилятора авиационного ГТД. АК характеризуются резким ростом амплитуды вибрационных напряжений до опасных значений, которые могут привести к механическим повреждениям элементов двигателя, поэтому они не допускаются ни на одном из эксплуатационных режимов работы ГТД [2].

Актуальность темы исследований обусловлена необходимостью надежной и своевременной диагностики ВС и АК рабочих лопаток вентилятора ГТД, с целью предотвращения развития опасной ситуации – достижения амплитудами вибрационных напряжений в элементах рабочего колеса опасных значений, что может привести к их повреждению. Это достигается за счет автоматизации процесса диагностики ВС и АК, позволяющей сократить время на принятие решения.

Целью данной работы является разработка эффективного метода обнаружения и контроля ВС и АК в процессе испытаний двигателя.

1. Постановка задачи

Традиционным методом определения появления и контроля ВС и АК является тензометрирование. Процесс, который является довольно трудоемким, включающий: препарирование лопаток тензодатчиками, прокладка проводов по двигателю и вывод проводов через токосъемник.

При вибрационных исследованиях ВС и АК датчики вибрации МВ-43-5Б устанавливались:

- в плоскости передней подвески: в вертикальном ($Y_{пп}$), поперечно-горизонтальном ($Z_{пп}$) и продольно-горизонтальном ($X_{пп}$) направлениях;

- в плоскости задней подвески в вертикальном направлении ($Y_{зп}$).

Подключались датчики вибрации к стендовой системе контроля. От стендовой системы контроля вибрации, с выходов неотфильтрованных сигналов, подключались к ИВК МІС-300М.

Дополнительно к ИВК МІС-300М подключались: датчик пульсации давления, установленный над лопатками вентилятора и тензодатчик, препарированный на рабочей лопатке вентилятора.

Анализ сигналов всех датчиков проводился с помощью программного обеспечения WinПОС [3], в частотном диапазоне до 2000 Гц.

Запас устойчивости линии рабочих режимов заключается в определении минимального и максимального сечений сопла, при которых отсутствуют неустановившиеся режимы работы двигателя. Для анализа выбраны характеристики с наиболее ярко проявившимися явлениями.

На дроссельной характеристике, с уменьшенным сечением сопла наружного контура, по сигналам тензодатчиков проявился ВС (рис. 1).

Временные сигналы не дают возможности определить начало появления и уровень ВС. Для этого строим спектрограммы для всех датчиков в один момент времени (рис. 2).

При появлении ВС по спектрам, построенным в один момент времени, на частоте вращения ротора $f_b = 28,076$ Гц по сигналу тензодатчика при суммарном размахе $\sigma_\Sigma = 11$ кгс/мм² видна лопаточная составляющая (гармоника) на частоте $f_d = 10,986$ Гц с уровнем напряжения $\sigma_d = 0,506$ кгс/мм², а на датчиках пульсации и вибрации – диагностическая составляющая (гармоника) $f_d = 17,090$ Гц с уровнями:

- $P_{вх} = 0,012$ кгс/см²;
- $Y_{пп}: a_d = 21,82$ м/с²;
- $Z_{пп}: a_d = 5,95$ м/с²;
- $X_{пп}: a_d = 21,98$ м/с²;
- $Y_{зп}: a_d = 0,84$ м/с².

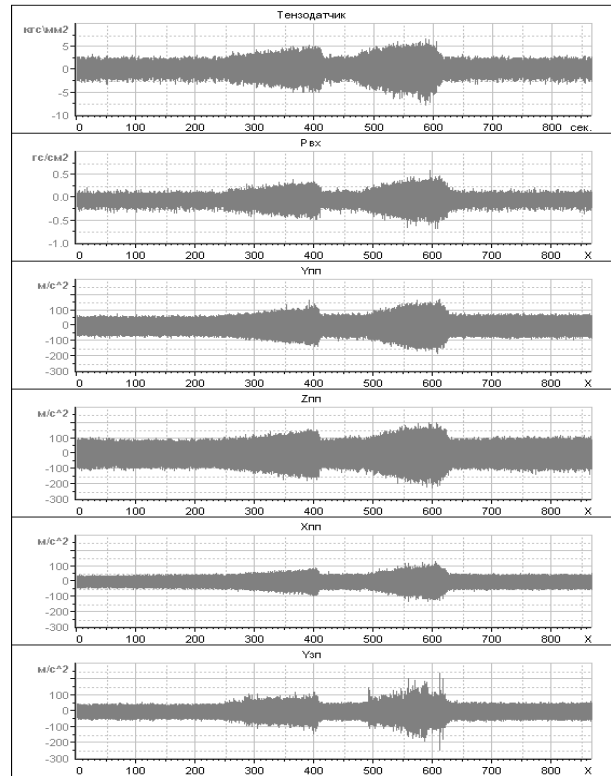


Рис. 1. Временные сигналы по датчикам: тензорезистора, пульсации и вибрации при ВС

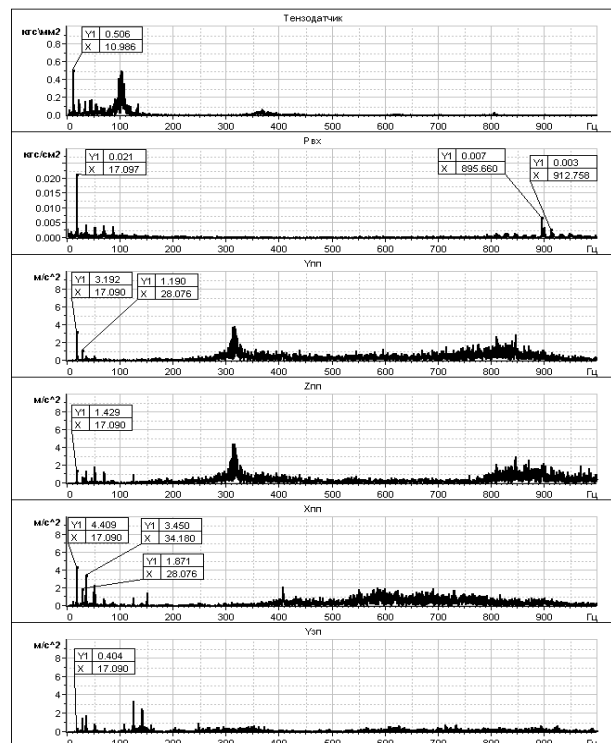


Рис. 2. Спектрограммы по датчикам: тензорезистора, пульсации и вибрации при ВС

Согласно теоретическим данным:

$$f_b = f_l + f_d. \quad (1)$$

В данном случае результат совпадает, что подтверждает правильность определения диагностической составляющей:

$$f_b = 10,986 + 17,09 = 28,076 \text{ Гц.}$$

Определено, что существует зависимость частот f_l и f_d от f_b ,

$$f_l/f_b = 10,986/28,076 = 0,39,$$

$$f_d/f_b = 17,09/28,076 = 0,61.$$

Исходя из полученных зависимостей, строим графики (рис. 3) с обработкой сигналов при помощи следящих фильтров по $f_l = 0,39 \cdot f_b$ и $f_d = 0,61 \cdot f_b$. Для удобства пульсации выразим в $\text{гс}/\text{см}^2$, а вибрации в $\text{мм}/\text{с}$.

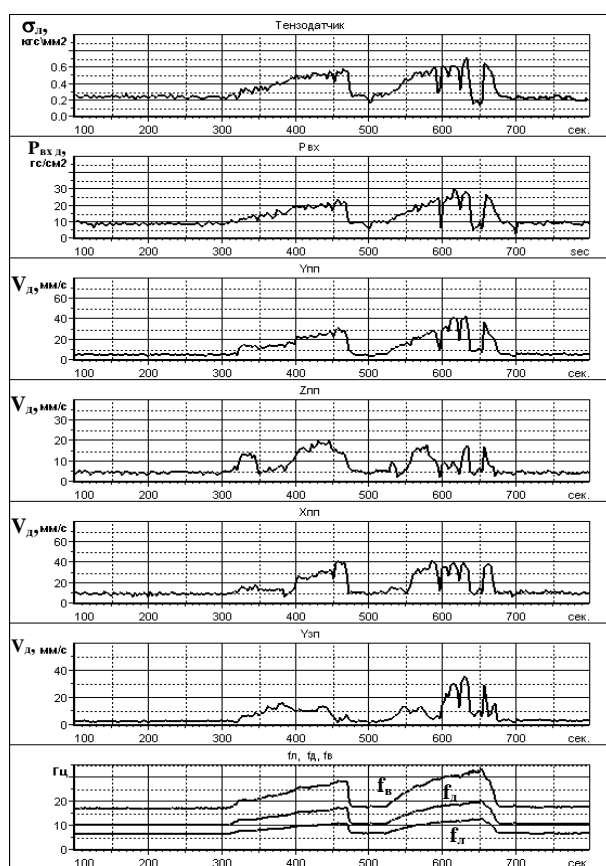


Рис. 3. Характеристики по лопаточной и диагностической частотам при ВС

В результате получили следующие максимальные уровни:

- $\sigma_d = 0,73 \text{ кгс}/\text{мм}^2$;
- $P_{вх\ д} = 30,6 \text{ гс}/\text{см}^2$;
- $Y_{пп}$: $V_d = 43,7 \text{ мм}/\text{с}$;
- $Z_{пп}$: $V_d = 20,0 \text{ мм}/\text{с}$;
- $X_{пп}$: $V_d = 42,8 \text{ мм}/\text{с}$;
- $Y_{зп}$: $V_d = 35,7 \text{ мм}/\text{с}$.

По датчику пульсации можно выделить присутствие в спектре составляющей на частоте $f_{сл} = 895,6 \text{ Гц}$ и двух компонент, равностоящих от нее ($f_{д1}$ и $f_{д2}$ равных $17,090 \text{ Гц}$). Частота следования определяется как произведение частоты вращения ротора на количество лопаток.

На дроссельной характеристике, с увеличенным сечением сопла наружного контура, по сигналам тензодатчиков проявились АК (рис. 4).

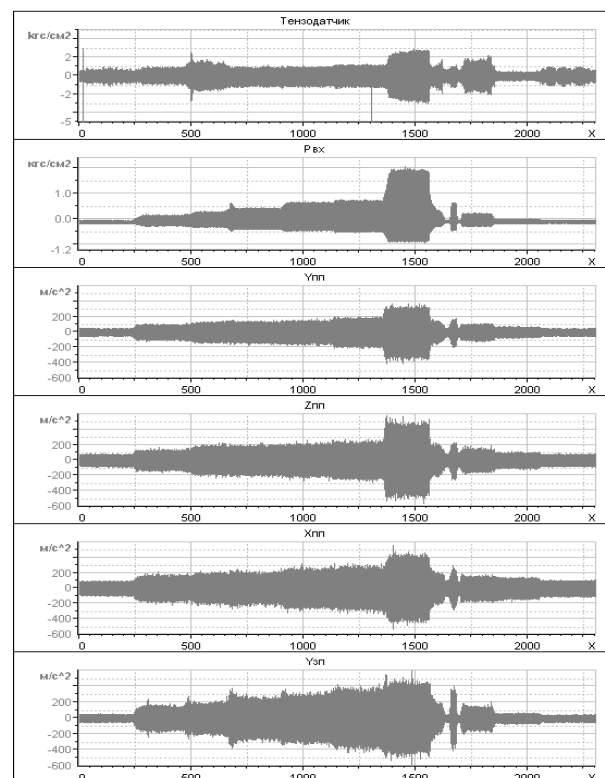


Рис. 4. Временные сигналы по датчикам: тензорезистора, пульсации и вибрации при АК

По временным сигналам всех трех типов датчиков точно определить появление АК и его уровень затруднительно, поэтому строим спектрограммы для всех датчиков (рис. 5).

При появлении АК по спектрограммам, построенным в один момент времени на частоте вращения ротора $f_b = 59,896 \text{ Гц}$ по сигналу тензодатчика при суммарном размахе $\sigma_\Sigma = 13 \text{ кгс}/\text{мм}^2$, видна лопаточная гармоника на частоте $f_l = 250,326 \text{ Гц}$ с уровнем напряжения $\sigma_l = 1,2 \text{ кгс}/\text{мм}^2$, а на датчиках пульсации и вибрации – диагностическая гармоника $f_d = 430,013 \text{ Гц}$ с уровнями:

- $P_{вх} = 0,012 \text{ кгс}/\text{см}^2$;
- $Y_{пп}$: $a_d = 21,82 \text{ м}/\text{с}^2$;
- $Z_{пп}$: $a_d = 5,95 \text{ м}/\text{с}^2$;
- $X_{пп}$: $a_d = 21,98 \text{ м}/\text{с}^2$;

— $Y_{\text{зп}}$: $a_d = 0,84 \text{ м/с}^2$.

Определено, что существуют зависимости частот f_d и f_d от f_B ,

$$f_{\text{л}}/f_B = 250,326/59,896 = 4,18,$$

$$f_d/f_B = 430,013/59,896 = 7,18.$$

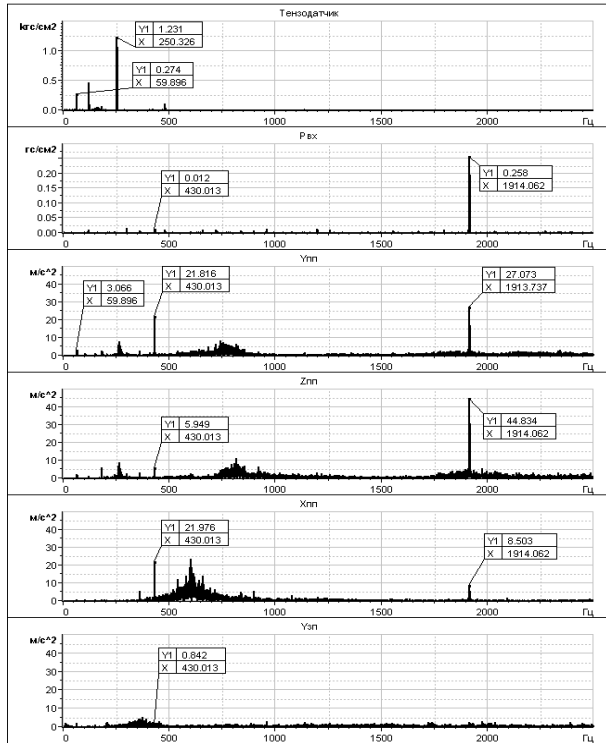


Рис. 5. Спектрограммы по датчикам: тензорезистора, пульсации и вибрации при АК

Рассмотрим формулу зависимости лопаточных и диагностических частот для АК:

$$f_d = f_{\text{л}} + m \cdot f_B, \quad (2)$$

где m – число узловых диаметров.

Так как f_B – известная величина, вынесем ее за скобки $f_d = f_B (f_{\text{л}}/f_B + m)$, далее подставляем ранее полученный коэффициент отношения $f_{\text{л}}/f_B$.

В результате получаем формулу для определения диагностических гармоник с разным количеством узловых диаметров для вентилятора рассматриваемого двигателя:

$$f_d = f_B (4,18 + m). \quad (3)$$

Дополнительно можно сделать вывод, что колебания лопаток происходило с тремя узловыми диаметрами.

По датчикам пульсации и вибрации можно выделить присутствие в спектре составляющей на ча-

стоте следования лопаток $f_{\text{сл}} = 1914,06 \text{ Гц}$ и две компоненты, равностоящие от нее ($f_{\text{д1}}$ и $f_{\text{д2}}$, равные $430,013 \text{ Гц}$), с очень низкими уровнями.

Исходя из полученных зависимостей, строим графики с обработкой сигналов при помощи следующих фильтров по $f_{\text{л}} = 4,18 \cdot f_B$ и $f_d = 7,18 \cdot f_B$. Для удобства пульсации выразим в гс/см^2 , а вибрации – в мм/с (рис. 6).

В результате получили следующие максимальные уровни:

$$\text{— } \sigma_{\text{л}} = 1,4 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\text{— } P_{\text{вх д}} = 14,0 \text{ гс/см}^2;$$

$$\text{— } Y_{\text{пп}}: V_{\text{д}} = 8,9 \text{ мм/с};$$

$$\text{— } Z_{\text{пп}}: V_{\text{д}} = 2,1 \text{ мм/с};$$

$$\text{— } X_{\text{пп}}: V_{\text{д}} = 8,6 \text{ мм/с};$$

$$\text{— } Y_{\text{зп}}: V_{\text{д}} = 3,4 \text{ мм/с}.$$

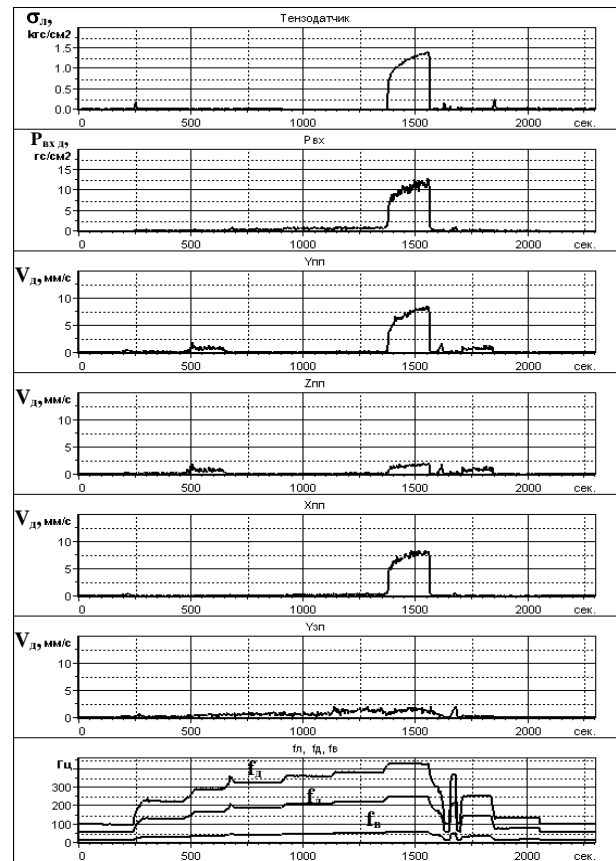


Рис. 6. Характеристики по лопаточной и диагностической частотам при АК

На основании проведенных исследований можно определить зависимости уровней диагностических гармоник датчиков вибрации и пульсации от лопаточных гармоник тензодатчика:

– при ВС для диапазона частот $5 \dots 50 \text{ Гц}$:

$\sigma_d = 0,025$ кгс/мм² соответствует $V_d = 1,0$ мм/с и $P_{вх\ d} = 1,0$ гс/см²;

– при АК для диапазона частот 100...500 Гц:

$\sigma_d = 0,1$ кгс/мм² соответствует $V_d = 0,7$ мм/с и $P_{вх\ d} = 1,0$ гс/см².

Исходя из полученных зависимостей и учитывая допустимые значения напряжений на лопатках вентилятора, назначаем предельные уровни для диагностических гармоник для данного двигателя, см. таблица 1.

Таблица 1

Предельные уровни

Датчик	Повышенный уровень		Опасный уровень	
	ВС	АК	ВС	АК
σ_d , кгс/мм ²	0,75	5,0	1,0	7,0
V_d , мм/с	30,0	35,0	40,0	50,0
$P_{вх\ d}$, гс/см ²	30,0	50,0	40,0	70,0

Предельные уровни предоставляют возможность контролировать процесс роста уровня диагностических составляющих и своевременно снизить режим работы двигателя, либо перейти выше, исключив появление опасных ситуаций.

Следует отметить, что при ВС и АК наиболее информативные датчики вибрации $Y_{пп}$ и $X_{пп}$. При этом $Y_{пп}$ является штатным датчиком, что позволяет использовать сигнал для контроля при проверках отсутствия неустойчивых режимов работы на опробовании двигателя в составе летательного аппарата без установки дополнительных датчиков.

Контролировать ВС и АК по диагностическим частотам и частотам следования лопаток в процессе испытаний только лишь при помощи спектрального анализа трудоемко, малоэффективно и требует определенных навыков специалиста.

Заключение

Экспериментально определено, что при ВС и АК в спектрах датчиков вибрации и пульсации присутствуют диагностические гармоники, имеющие зависимость от частоты вращения ротора вентилятора, что позволяет их выделить из широкополосного сигнала.

В процессе испытаний рассмотренного типа двигателей с предполагаемым появлением ВС и АК целесообразно контролировать по датчикам вибрации узкополосными следящими фильтрами. Контроль следует выполнять на частотах f_d : $0,61 \cdot f_b$, $4,18 \cdot f_b$, $5,18 \cdot f_b$, $6,18 \cdot f_b$, $7,18 \cdot f_b$ и т.д., в зависимости от

предполагаемого количества узловых диаметров, и не превышая назначенных предельных уровней.

Контроль ВС и АК в процессе испытаний по датчикам вибрации стендовой системы измерения вибраций не требует дополнительных затрат и может выполняться одновременно с контролем уровней вибраций по первым роторным гармоникам с помощью ИВК МС-300М.

Для контроля неустойчивых режимов работы других типов двигателей необходимо проводить новое исследование по датчикам вибрации и пульсации совместно с тензометрированием, для определения диагностических частот. Существуют случаи определения диагностических частот и частоты колебания лопаток при анализе только по сигналам датчиков вибрации без выполнения совместного тензометрирования.

Литература

1. Чигрин, В. С. Экспериментальное исследование неустойчивых режимов работы ступени осевого компрессора [Текст] / В. С. Чигрин, Ф. Мохаммадсадеги // Конструкция и прочность. – 2015. – С.54-58.
2. Михайлов, А. Л. Вибродиагностика автокосмических колебаний рабочего колеса вентилятора ТРДД в режиме реального времени [Текст] / А. Л. Михайлов, О. Л. Посадова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9(45). – С. 110-114.
3. WinPos – Пакет обработки сигналов. Руководство пользователя, редакция 3.2, БЛИЖ, 409801.002-04 90 [Текст]. – Мытищи : НПП «Мера», 2014. – 184 с.

References

1. Chigrin, V.S., Mohammadsadegi, F. Experimental study of unstable operating modes of axial compressor stage]. *Design and strength*, 2015, pp. 54-58.
2. Mikhailov, A. L., Posadova, O. L. *Vibrodiagnostika avtokosmicheskikh kolebaniy rabocheho koleasa ventilyatora TRDD v rezhime real'nogo vremeni* [Vibrodiagnostics of TRDD fan impeller vibrations in real time]. *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tehnologiya - Aerospace technic and technology*, 2007, no. 9 (45), pp. 110-114.
3. *WinPos signal processing package. User Manual, Revision 3.2*, BLIG, 409801.002-04 90. Mytishi, NPP «MERA» Publ., 2014. 184 p.

Поступила в редакцию 16.04.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА КОНТРОЛЬ НЕСТІЙКИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГТД ЗА СИГНАЛАМИ ДАТЧИКІВ ВІБРАЦІЇ У ПРОЦЕСІ ВИПРОБУВАНЬ

I. V. Voytenko

Забезпечення надійної та своєчасної діагностики та контролю обертового зриву і автоколивань на робочих лопатках вентилятора і перших ступенях компресорів ГТД авіаційного і наземного застосування при спеціальних стендових випробуваннях, на стадії доведення двигуна, є актуальною темою. Для вирішення питання виконано спектральний аналіз сигналів датчиків вібрації, стендової системи контролю, зареєстрованих при перевірці двигуна на нестійкі режими роботи. Виявлено діагностичні складові, що з'являються в сигналах датчиків вібрації при обертовому зриві і автоколиваннях в моменти появи напружень на лопаткових складових сигналів тензодатчиків. Визначено існування залежності лопаточної складової та діагностичних складових від частоти обертання ротора. Отримана залежність дає можливість виділити з широкосмугового сигналу діагностичні складові подібно побудови вібрацій по першим роторним гармонікам. Опрацьована методика контролю обертового зриву і автоколивань в процесі випробувань ГТД, з призначеними граничними рівнями, пропорційними рівнями напруг на лопатках вентилятора. Показано, що найкращим, з точки зору простоти реалізації і економічності, способом контролю нестійких режимів роботи є метод із застосуванням слідкувальних фільтрів на діагностичних частотах. При цьому технічно простіше використовувати наявні датчики вібрації, що застосовуються при контролі перших роторних гармонік, ніж встановлювати додаткові датчики пульсації, виконуючи доопрацювання в конструкції двигуна, не згадуючи про комплекс робіт необхідних для проведення тензометрирування. До того ж комплекс сигналів штатних і технологічних датчиків вібрації стендового контролю дозволяє визначити діагностичні частоти будь-якого елемента конструкції двигуна: вентилятора, компресора, турбіни. Після налаштування вібраційної апаратури на необхідні діагностичні частоти, вести контроль може фахівець без навичок з діагностики вібраційних сигналів, що зручно при перших випробуваннях двигуна в експлуатації, де контроль в польоті веде експериментатор.

Ключові слова: датчик вібрації; обертовий зрив; автоколивання; стежачий фільтр.

IDENTIFICATION AND CONTROL OF UNSTABLE OPERATING MODES OF GTE BY VIBRATION SENSOR SIGNALS IN THE TEST PROCESS

I. V. Voytenko

Ensuring reliable and timely diagnostics and control of a rotating stall and self-oscillations on the fan blades and the first stages of GTE compressors for aviation and ground application with special bench tests, at the engine development stage, is a relevant topic. To solve the problem, spectral analysis of the vibration sensor signals, the bench control system, registered during the engine check for unstable modes of operation, was performed. Diagnostic components that appear in the signals of vibration sensors with rotating breakdown and auto-oscillations at the moments of the appearance of stresses on the blade components of the strain gauge signals are revealed. The existence of the dependence of the blade component and the diagnostic components on the rotor speed is determined. The dependence obtained makes it possible to isolate diagnostic components from the broadband signal, similar to the construction of vibrations using the first rotor harmonics. A method was developed to control rotating breakdown and self-oscillations in the course of GTE tests, with designated limit levels proportional to the stress levels on the fan blades. It is shown that the best, from the ease of implementation and efficiency, a method of monitoring unstable modes of operation is the method with the use of servo filters at diagnostic frequencies. At the same time, it is technically easier to use the available vibration sensors used in monitoring the first rotor harmonics than to install additional pulsation sensors, performing modifications to the engine design, without mentioning the work package required for strain gauging. Besides, the set of signals of standard and technological vibration sensors of the bench control allows determining the diagnostic frequencies of any element of the engine design: fan, compressor, turbine. After tuning the vibration equipment to the required diagnostic frequencies, a specialist with no skills in diagnosing vibration signals can maintain control, which is convenient for the first tests of the engine in operation, where the experimenter controls the flight.

Keywords: vibration sensor; rotating stall; self-oscillation; tracking filter.

Войтенко Игорь Валериевич – ведущий инженер-исследователь, группа вибрационных исследований ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Voytenko Igor Valerievich – Lead Research Engineer, Vibration Research Group SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: vigor1371@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-2485-1814.