

УДК 629.7.03.018

Б.Б. Коровин¹, О.Н.Былинкина¹, М.В. Кузьмин²

¹ОАО «Летно-исследовательский институт им. М.М.Громова», Россия.

²ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн» НТЦ им. А.Люльки, Москва, Россия

К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТРДДФ МАНЕВРЕННОГО САМОЛЕТА ПО ВИБРОСИГНАЛУ

Летные исследования вибраций ТРДДФ при использовании сигнала с широкополосного выхода датчика на изгибной керамике, установленного в штатном месте измерений на промежуточном корпусе двигателя, показали высокие диагностические возможности такого датчика. Использование при обработке и анализе широкополосного вибросигнала специализированного программно-аппаратного комплекса и частотных моделей двигателя, разработанных на основе его кинематической схемы, позволили выявить основные источники виброактивности в условиях эксплуатации на маневренном самолете, сформулировать подходы по уточнению процедур бортового и послеполетного контроля и диагностики состояния двигателя по вибросигналу. В указанных подходах, помимо бортового контроля СКЗ вибрации с выдачей летчику предупреждающей сигнализации, предусмотрено внедрение технологии индивидуального виброконтроля состояния двигателя по параметрам СКЗ и первых роторных гармоник, а также получение и использование матрицы состояния двигателя, содержащей допустимый уровень (соотношение) характерных узкополосных составляющих вибраций в полосе 60–8000 Гц.

Ключевые слова: вибросигнал, шариковый подшипник, межроторный подшипник, диагностический признак, составляющая спектра, сепаратор, гармоника, комбинационная гармоника, контроль.

Введение

При вибрографировании ТРДДФ в процессе его подконтрольной эксплуатации на маневренном самолете было выявлено большое число значимых составляющих вибрации в роторной полосе частот и за ее пределами, а также возможность контроля в штатном месте измерения составляющих вибраций, генерируемых элементами межроторного (роликового) и радиально упорных шариковых подшипников [1],[2]. Это свидетельствует об определенных резервах повышения эффективности эксплуатационного виброконтроля состояния авиадвигателей. Настоящее сообщение посвящено уточнению концепции такого контроля при использовании широкополосного вибросигнала.

1. Формулирование проблемы и методы ее решения

Большое число значимых нероторных составляющих вибрации и кратковременное доминирование некоторых из них в спектре вибросигнала ТРДДФ с межроторным подшипником в силовой схеме в роторной полосе частот не позволяет рассматривать СКЗ вибраций в указанной полосе частот в качестве единственного надежного параметра бортового виброконтроля состояния двигателя [1],[2],[3],[4]. В частности, в

качестве доминирующих в спектре на максимальных (М) и форсированных (Ф) режимах работы исправного двигателя могут выступать, как сепараторная составляющая межроторного подшипника (МРС) на частоте вращения сепаратора межроторного подшипника, так и комбинационная составляющая $1/2(ВД+НД)$ на частоте полусуммы частот вращения роторов высокого (ВД) и низкого (НД) давления.

Выявленные особенности виброактивности и высокие диагностические возможности широкополосного вибросигнала обследуемого типа двигателя, позволили уточнить процедуры его бортового и послеполетного виброконтроля. При этом использовался цифровой спектральный анализ сигнала с широкополосного выхода интеллектуального датчика V-318 на изгибной керамике, установленного в штатном месте измерения вибрации на промежуточном корпусе двигателя.

Высокочастотные сигналы вибрации и частот вращения роторов двигателя регистрировались на бортовой твердотельный накопитель. Автоматизированная обработка и анализ вибропроцессов и других полетных данных осуществлялись с помощью специализированного программно-аппаратного комплекса ЛИИ [5]. При идентификации узкополосных составляющих вибросигнала в полосе частот до 8 кГц использова-

лись частотные модели двигателя, разработанные на основе его кинематической схемы.

2. Решение проблемы

2.1. Резюме по результатам подконтрольной летной эксплуатации ТРДДФ с использованием датчика V-318

Летные исследования вибраций обследуемого ТРДДФ в процессе его подконтрольной эксплуатации на маневренном самолете при использовании широкополосного выхода датчика V-318 позволили выявить основные источники виброактивности двигателя. К наиболее важным результатам исследований, которые должны быть учтены при разработке стратегии вибрационно-го контроля и диагностики двигателя в эксплуатации следует отнести:

- наличие в роторной полосе частот 60 - 270 Гц, помимо первых роторных гармоник 1РНД и 1РВД, большого числа значимых источников вибрации (МРС, рессоры выносной коробки агрегатов (ВКА), 1/2(НД+ВД), 1/2(НД+0,94ВД), ≈0,9РВД и др.);

- возможность контроля в штатном месте измерений составляющих вибрации, генерируемых элементами межроторного (роликового) и радиально упорных шариковых подшипников (МРП и ШП);

- регулярное проявление в спектре вибросигнала значимых комбинационных составляющих вибраций, их гармоник и субгармоник;

- возможность кратковременного доминирования в роторной полосе частот вибросигнала составляющих МРС, 1/2(НД+ВД), 1/2(НД+0,94ВД).

В таблице 1 представлен перечень основных узкополосных составляющих вибраций и максимальные значения их интенсивности, полученные в 65-ти полетах подконтрольной эксплуатации обследуемого ТРДДФ на маневренном самолете.

Номенклатура указанных в таблице 1 вибропараметров, определяющих виброактивность двигателя, существенно расширяет возможности контроля и диагностики его состояния в эксплуатации. Содержание же самой таблицы можно рассматривать как нормативную матрицу вибрационного состояния двигателя. В частности, наличие в вибросигнале составляющей ≈ 0,9 РВД является признаком наличия масла в роторе высокого давления. Существенное превышение уровней 2-й роторной гармоники над 1-ой для каждого из роторов НД и ВД свидетельствует о нарушении их соосности, а по интенсивности пиковых значений составляющих 34РНД, 38РНД и 42РНД, на частотах следования рабочих лопаток I, IV и II ступени КНД, можно судить о глубине заедания ротора КНД о статор.

Не менее информативен параметр контроля п. 4 матрицы состояния. Как показано в [2], одновременное превышение амплитудным значением МРС пороговых значений 30-40мм/с на максимальных режимах работы двигателя и 3,5 мм/с на режиме МГ при увеличении их интенсивнос-

Таблица 1

Матрица оценки состояния двигателя по вибросигналу

№ п/п	Параметр контроля (составляющая вибраций)	Максимальный зафиксированный уровень, мм/с. (* отношение)	Примечание
1	СКЗ в роторной полосе частот	17,5	Норма: 50 мм/с 70 мм/с (краковременно)
2	1РНД	16,4	
3	1РВД	24,5	После смены реж. М на Ф
4	МРС на режимах М и М+Ф МРС на режиме МГ	16,0 <2	На фигуре «колокол»
5	ШПС _{ВД} (сепаратор ШП _{ВД})	3,9	При N2 = 95%
6	МР ТК (тела качения МРП)	7,2	При N2 = 94,5%
7	ШП _{нВД} (тела качения ШП _{ВД})	3	Управляемый штопор
8	ШПС _{НД} (сепаратор ШП _{НД})	5	При N2 = 98,5%
9	ШП _{кНД} (тела качения ШП _{НД})	7,5	При N2 = 63,5%
10	ШПВО _{ВД} (внешняя обойма ШП _{НД})	1,8	При N2 = 94-98,5%
11	1/2(РНД+РВД) на режимах М и М+Ф	15,9	Не всегда отличима от составляющей МРС
12	34РНД (на F следован. РЛ 1ст КНД)	11,5	В нелин. области АЧХ изм. тракта
13	38РНД (на F следован. РЛ IVст КНД)	10,3	В нелин. области АЧХ изм. тракта
14	42РНД (на F следован. РЛ IIст КНД)	11,1	В нелин. области АЧХ изм. тракта
15	2 РНД (2-я гармоника НД)	8,8	В наборах и при разгоне самолета
16	2 РВД (2-я гармоника ВД)	6,5	Существ. отличия тяги двигателей
17	1/2(НД+0,94ВД)	6,2	При реализации п. 20
18	ВКА (рессора ВКА)	9,0	Резонанс при N1/N2 = 86%/76%
19	Виброгорение в форсажной камере с F=350-500Гц в раб. диапазоне N1(N2)	20	Наземная гонка после холодного запуска
20	0,9 - 0,94 РВД (масло в роторе)	11,5	Макс. время проявления 2,3 мин.
21	2РНД/1РНД (перекос ротора НД)	3,5*	В наборах и при разгоне самолета
22	2РВД/1РВД (перекос ротора ВД)	9*	Существ. отличия тяги двигателей

ти в процессе дальнейшей эксплуатации может означать наличие дефекта в межроторном подшипнике. Поэтому представленные на рисунке 1 гистограммы наработок обследуемого двигателя при различных уровнях МРС в процессе его подконтрольной эксплуатации на различных режимах свидетельствуют об отсутствии проблемы по межроторному подшипнику за подотчетный период.

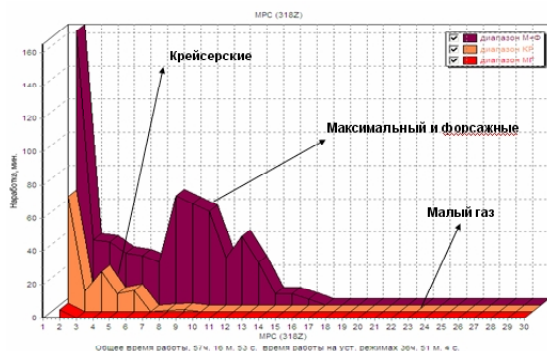


Рис. 1. Вибронаработка составляющей МРС на различных режимах работы двигателя

2.2. Оценка виброактивности обследуемого ТРДД с помощью индивидуальных вибромоделей

Потенциальные возможности использования широкополосного вибросигнала для повышения эффективности виброконтроля технического состояния обследуемого двигателя базируются не только на спектральном анализе этого сигнала, последующей идентификации и следящей фильтрации узкополосных составляющих вибраций, генерируемых роторами, подшипниками и другими его элементами, но и на автоматизированном получении вибромоделей двигателя для каждой из характерных составляющих.

Вибромодель (вибропортрет) двигателя для конкретной составляющей его вибропроцесса представляет собой графическую последовательность пределов зафиксированных в полете максимальных и минимальных значений вибрации для всех поддиапазонов частоты вращения ротора, соответствующих в совокупности всей области режимов работы двигателя по N2 (N1).

Каждый поддиапазон вибрационной модели имеет цветовую градацию статистической достоверности не превышения вибропараметром его границ, а сами модели пригодны к непрерывному уточнению по мере поступления на вход новых данных. По достижении высокой статистической достоверности на этапе обучения границы модели фиксируются и при дальнейшей эксплуатации двигателя могут использоваться в ре-

жиме контроля, когда выход значений вибропараметра за их пределы рассматривается как предпосылка к неисправности.

Принципы индивидуального виброконтроля с помощью вибромоделей впервые были обоснованы В.В. Червонюком. Указанные подходы были им апробированы при использовании модели для СКЗ вибраций с шагом по частоте вращения ротора ВД 2% применительно к ГТД транспортного самолета, имеющего стабильный полетный цикл с доминирующей наработкой на установившихся режимах.

Современные бортовые средства регистрации и анализа высокочастотных процессов позволяют получать вибромоделей, в том числе, в реальном времени не только для СКЗ, но и для узкополосных составляющих вибропроцесса в полосе частот, существенно превышающей роторные. Использование таких возможностей – серьезный резерв для повышения эффективности эксплуатационного контроля состояния авиадвигателей по вибросигналу [6].

В результате полномасштабной автоматизированной цифровой обработки вибраций с широкополосного выхода датчика V-318 и сигналов со штатных датчиков частот вращения роторов обследуемого ТРДД для всех 65 полетов подконтрольной эксплуатации были получены обобщенные вибромоделей для основных вибропараметров, представленных в таблице 1.

Принимая во внимание многообразие полетных циклов обследуемого ТРДД, высокую добротность конструкции двигателя при вибрациях, которые нередко имели нестационарный характер при фиксированных частотах вращения роторов, модели рассчитывались для квазиустановившихся режимов работы двигателя из условий не превышения $\delta N2 = 0,9\%$ и $N1 = 0,7\%$ в течение 10 секунд. Дискретность моделей по N2 (N1) составила 0,5%, а время наработки, определяющее достоверность экстремальных (минимального и максимального) значений вибропараметра в конкретном диапазоне N2 (N1), при котором происходила фиксация его границ, принималось равным 20 минутам.

Приемлемость вышеуказанных настроечных параметров программы автоматизированного построения моделей успешно верифицирована. Так, отличие максимальных за все время подконтрольной эксплуатации двигателя амплитудных значений вибрации в модели, полученной для составляющей 1РВД, и при ручной оценке соответствующего включению в модель характерного «всплеска» вибропроцесса во временной области не превышало 4% при том, что время проявления указанного максимального значения вибраций 25.5 мм/с, составляло микросекунды.

Расчеты режимной наработки двигателя при подконтрольной эксплуатации показали, что подавляющее время двигатель эксплуатируется на режимах 94 - 95%; 33 - 34% по N1 и 95 - 97%; 70 - 72% - на режимах по N2 (см. рис. 2).

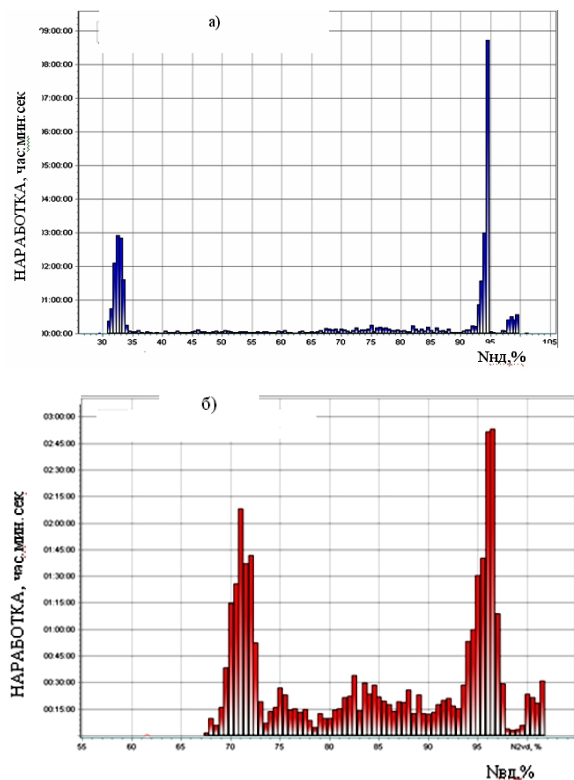


Рис. 2. Режимная наработка двигателя по N1(а) и N2 (б) за время подконтрольной эксплуатации

На рисунке 3 показаны обобщенные вибромодели двигателя для составляющих СКЗ, 1РНД, 1РВД и МРС по N2 с демонстрацией текущих границ изменения соответствующего параметра в каждом из полетов по мере их включения в модель при расчете предельных значений границ выделенного поддиапазона в процессе испытаний.

Из рассмотрения представленных на рисунке 3 вибрационных моделей для СКЗ, РНД и РВД можно сделать вывод, что максимальный вклад в виброактивность двигателя в эксплуатационных условиях вносит ротор высокого давления. Именно поэтому вибромодель для СКЗ вибраций в роторной полосе частот структурно напоминает конфигурацию модели для РВД.

В целом же, максимальная виброактивность двигателя в роторной полосе частот определяется составляющими 1РВД, 1РНД, МРС и 1/2(НД+ВД) на режимах 93 - 97% по N2, и только одна из них 1РВД имеет достаточно высокий (12 - 13мм/с) уровень по амплитуде и на малых режимах.

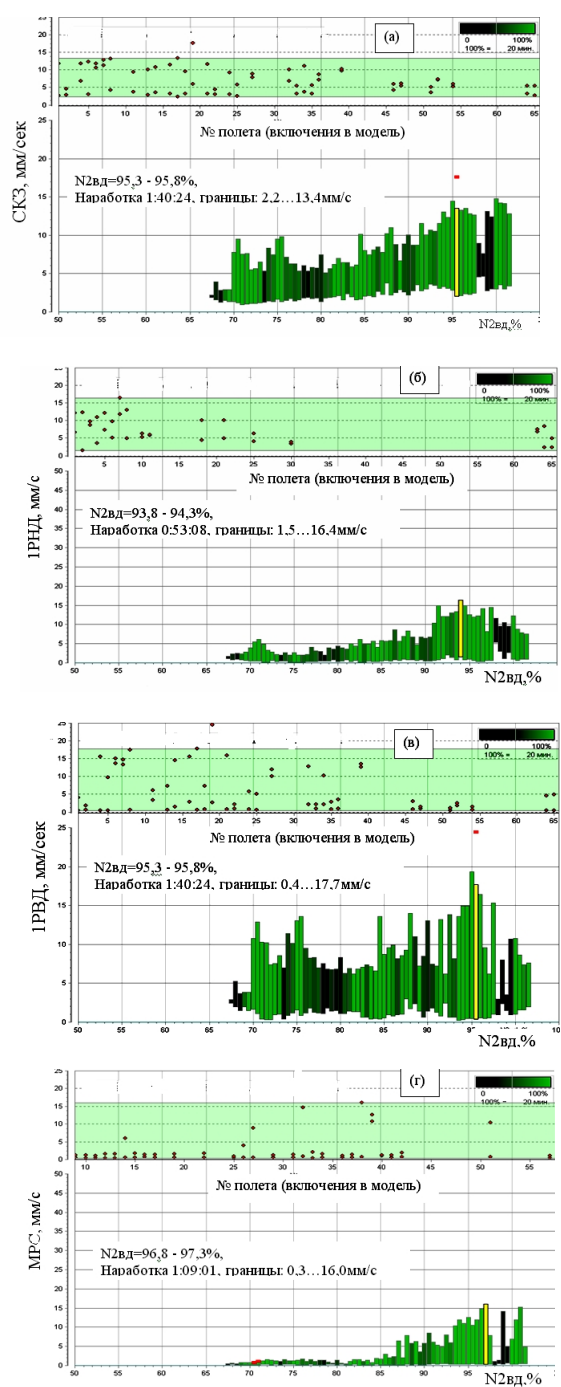


Рис. 3. Обобщенные вибромодели двигателя для параметров СКЗ (а), РНД (б), РВД (в) и МРС (г) с демонстрацией изменения их экстремальных границ по мере включения в выделенный поддиапазон

Цветовая структура моделей свидетельствует о достижении для большинства их поддиапазонов назначенной степени достоверности по 20 минутной наработке. Так как наработка по подавляющего числа поддиапазонов моделей составляла более 1,5 часов, а их конфигурация (границы) оставались неизменными в течение пос-

ледних 10-ти полетов, при дальнейшей эксплуатации двигателя вибрационные модели будут использованы в режиме контроля.

На рисунках 3а, 3б и 3в показана имитация гипотетического отказа при использовании моделей в режиме контроля в виде заметного отклонения вибропараметра от верхней границы одного из поддиапазонов. Это сделано путем искусственного вычленения из моделей полета №13 подконтрольной эксплуатации, в котором в поддиапазоне N2 = 95,5% были зафиксированы максимальные за время испытаний вибрации.

Можно ожидать, что в случае реального появления существенного отклонения уровня вибраций от зафиксированных на этапе обучения границ в моделях для СКЗ, РНД и РВД, их совместное рассмотрение с информацией, содержащейся в матрице состояния, повысит эффективность контроля состояния двигателя по вибросигналу. Так, в случае имитируемого отказа, когда отклонение от верхней границы для СКЗ совпало с подобным отклонением в одинаковом поддиапазоне по N2 только для РВД позволило уверенно приписать указанный эффект изменению виброактивности ротора высокого давления. Очевидно, что дополнительная информация, например, об уровне диагностических вибрационных признаков состояния подшипников из матрицы состояния при реальном отказе будет содействовать принятию адекватного решения.

Особенности протекания графика режимной наработки на рис. 2 и конфигурация вибрационной модели для МРС на рис. 3г поясняет выбор формы представления вибронаработки для МРС в виде гистограмм при идентификации дефекта межроторного подшипника. В самом деле, режимная наработка имеет выраженные экстремумы для различных диапазонов частот вращения роторов, а вибромодель для МРС характеризуется очень большими отличиями минимальных и максимальных амплитудных значений в поддиапазонах, где она имеет повышенный уровень.

Заключение

В уточненной концепции эксплуатационного виброконтроля состояния ТРДДФ при использовании широкополосного вибросигнала, помимо бортовой оценки СКЗ вибраций с выдачей предупреждающей сигнализации летчику целесообразно предусмотреть:

- внедрение технологии индивидуального виброконтроля состояния двигателя по параметрам СКЗ, РНД и РВД;

- получение и использование матрицы состояния двигателя, содержащей допустимый уровень всех узкополосных составляющих вибрации в полосе частот 60-10000Гц, включая составляющие, генерируемые подшипниками;

- выявление отказа межроторного подшипника по одновременному увеличению в процессе эксплуатации назначенных пороговых значений интенсивности его сепараторной составляющей в области малых и высоких режимов.

Литература

1. Коровин Б.Б. Виброактивность ТРДДФ с межроторным подшипником в эксплуатационных условиях [Текст]/ Коровин Б.Б., Былинкина О.Н. Кузьмин М.В. // Авиационно-космическая техника и технология. -2011.-№ 9/86.-С.124-133.

2. Былинкина, О.Н. К диагностике состояния межроторного подшипника по вибросигналу [Текст]/ Былинкина О.Н., Коровин Б.Б., Брычева Е.В. // Авиационно-космическая техника и технология. -2011.-№10/87.- С.127-133.

3. Назаренко, Ю.Б., Диагностика роторов и межроторного подшипника по виброскоростям на корпусах двухвальных турбореактивных двигателей. [Текст]/ Назаренко Ю.Б., Светашова Л.Ф. // Авиационно-космическая техника и технология. -2009.-№9/66.-С.

4. Колотников М.Е. Динамика роторов двухвальных турбореактивных двигателей. Проблемы межроторного подшипника. [Текст]/ Колотников М.Е. Назаренко Ю.Б., Иванов А.В., Светашова Л.Ф.//Научно-технический конгресс по двигателестроению. НТДК. 2008. Десятый междунар. салон: сб. тез.-М.,2008.- С.112.

5. Былинкина О.Н. Программно-аппаратный комплекс для летно-прочностных испытаний авиационных ГТД нового поколения [Текст]/ Былинкина О.Н., Коровин Б.Б., Стасевич А.А. // Авиационно-космическая техника и технология. -2005.-№9/25.-С.56-60.

6. Коровин Б.Б. Автоматизированный контроль динамического нагружения межроторного подшипника ТРДДФ в эксплуатации по штатному вибросигналу [Текст]/Коровин Б.Б., Стасевич А.А. // Авиационно-космическая техника и технология. -2011.-№8/859/86.-С.145-148.

Поступила в редакцию 01.06.2012

Б.Б. Коровін, О.Н.Билінкіна, М.В. Кузьмін. До підвищення ефективності контролю стану ТРДДФ маневреного літака по вібросигналу

Льотні дослідження вібрацій ТРДДФ при використанні сигналу з широкополосного вихода датчика на гнучкій кераміці, вставленого в штатному місці замірів на проміжному корпусі двигуна, показали високі діагностичні можливості такого датчика. Використання при обробці та аналізі широкополосного вібросигналу спеціалізованого програмно-апаратного комплексу і частотних моделей двигуна, розроблених на основі його кінематичної схеми, дозволили виявити основні джерела віброактивності в умовах експлуатації на маневреному літаку, сформулювати підходи по уточненню процедур бортового і післяльотного контролю і діагностики стану двигуна по вібросигналу. Вказаних підходах, окрім бортового контролю СКЗ вібрації з виданням пілоту попереджувальній сигналізації, передбачено впровадження технології індивідуального віброконтролю стану двигуна за параметрами СКЗ і перших роторних гармонік, а також одержання і застосування матриці стану двигуна, яка містить допустимий рівень (відношення) характерних узькополосних складових вібрацій в полосі 60...8000 Гц.

Ключові слова: вібросигнал, кульковий підшипник, міжроторний підшипник, діагностична ознака, складова спектра, сепаратор, гармоніка, комбінаційна гармоніка, контроль.

B.B. Korovin, O.N. Bylinkina, M.V. Kuzmin. To promote vibration monitoring effectiveness of the maneuver airplane afterburning turbofan

Afterburning turbofan vibration flight research with the help of flexible ceramics vibration pickup installed in standard engine measurement place on the intermediate casing have being demonstrated high diagnostic effect. Using while data processing wide spread frequency vibration signal, special program-apparatus complex and engine cinematic scheme frequencies a lot of engine vibration components have being identified. Moreover, onboard and after flight diagnostic procedures have being formulated. Besides onboard pilot dangerous vibration warning alerting, individual engine vibration monitoring technology have being proposed for RMS and rotors harmonics vibration signal as well as a special list of allowance limit for vibration components in the frequencies range 60...8000 Hz.

Key words: vibration signal, ball bearing, intershaft bearing, diagnostic sign, spectrum component, separator, harmonic, combinative oscillation, monitoring.