

УДК 629.7.03.018

О.Н. БЫЛИНКИНА, Б.Б. КОРОВИН, А.А. СТАСЕВИЧ*ОАО «Летно-исследовательский институт им. М.М.Громова», Россия.*

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ ТРДДФ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА МАНЕВРЕННОМ САМОЛЕТЕ

В результате вибрографирования ТРДДФ с межроторным подшипником в силовой схеме на маневренном самолете с помощью интеллектуального датчика на изгибной керамике, установленного в штатном месте измерения вибраций на промежуточном корпусе двигателя, оценены вибрации, генерируемые наиболее нагруженными подшипниками двигателя в эксплуатационных условиях. Выявлены условия работы двигателя, при которых сепараторные составляющие вибраций межроторного роликового и радиально упорного шарикового подшипников доминируют в спектре вибросигнала. Прдемонстрированы особенности проявления вибрационных диагностических признаков состояния подшипников при выполнении пилотажной фигуры «колокол», в перевернутом полете, при разворотах самолета на больших углах атаки и в управляемом штопоре.

Ключевые слова: межроторный подшипник, радиально упорный шариковый подшипник, вибрационный диагностический признак, составляющая спектра, сепаратор, гармоника, маневренный самолет, контроль.

Введение

Ранее в [1 – 4], было показана продуктивность использования методов вибрационной диагностики применительно к оценке состояния межроторных подшипников ТРДДФ в эксплуатационных условиях. Настоящая публикация посвящена анализу проявления диагностических признаков состояния не только межроторных, но и шариковых радиально упорных подшипников ТРДДФ в условиях его работы на маневренном самолете.

1. Формулирование проблемы и методы ее решения

Необходимость контроля технического состояния подшипников ТРДДФ маневренных самолетов в процессе летной эксплуатации диктуется тяжелыми условиями работы указанных узлов и катастрофическими последствиями в случае их разрушения. Решение указанной проблемы методами вибрационной диагностики базируется на использовании вибросигнала с широкополосного выхода интеллектуального датчика V-318 на изгибной керамике, смонтированного в штатном месте измерения вибрации на промежуточном корпусе двигателя. При этом представлялось целесообразным оценить уровни и условия проявления вибрационных диагностических признаков состояния подшипников для исправного двигателя в

процессе его подконтрольной эксплуатации. В частности, как было показано в [3] и [4] применительно к межроторному подшипнику, при работе ТРДДФ на маневренном самолете подобные проявления не обязательно связаны с дефектом подшипника, и при разработке алгоритмов контроля его состояния требуется учет дополнительных факторов.

Высокочастотные сигналы вибрации и частот вращения роторов двигателя, а также сопровождающая полетная информация регистрировались на бортовые твердотельные накопители. При обработке и анализе данных использовался специализированный программно-аппаратный комплекс ЛИИ [5].

Процедуры анализа предусматривали выделение и автоматическую идентификацию всех узкополосных составляющих вибраций в полосе частот 20-8000Гц при линейном характере АЧХ до 1кГц по виброскорости. Идентификация составляющих, генерируемых подшипниками двигателя, выполнялась с помощью частотных моделей, разработанных с использованием геометрических и кинематических характеристик подшипников (частоты вращения внутренней и наружной обойм, размеры внутреннего и наружного диаметров, число и диаметр тел качения, угол контакта).

Указанные частотные модели для межроторного роликового (МРП) и радиально упорных шариковых (ШП) подшипников опор высокого (ВД) и низкого (НД) давления соответствовали составляющим, аб-

бrevиатура и название которых представлены ниже:

- МРС (сепараторная для МРП);
- МРТК (тела качения МРП);
- ШПС_{ВД} (сепараторная для ШП_{ВД});
- ШП_{ТКВД} (тела качения ШП_{ВД});
- ШП_{ТКНД} (тела качения ШП_{НД});
- ШПВО_{ВД} (внешняя обойма ШП_{ВД}).

2. Результаты исследований

Проявление характерных составляющих, генерируемых межроторным роликовым, а также радиально упорными шариковыми подшипниками передней опоры ротора высокого давления и задней опоры КНД, в процессе подконтрольной летной эксплуатации обследуемого двигателя сопровождалось нестационарным характером протекания их интенсивности по времени при соизмеримости в ряде случаев максимальных значений этой интенсивности с уровнем роторных гармоник. Продемонстрируем это на ряде характерных примеров.

Один из них – изменение по времени амплитудных значений составляющей ШПС_{ВД} и роторных гармоник 1РВД и 1РНД при выводе двигателя на максимальный режим в горизонтальном полете на высоте $H = 8$ км и скорости по прибору $V_{пр} = 480$ км/ч, показанное на рис. 1.

Из рассмотрения рисунка, в частности, видно, что уровень сепараторной составляющей радиально

упорного подшипника передней опоры ротора ВД кратковременно достигал уровня составляющей 1РВД.

Соизмеримость интенсивностей сепараторной составляющей ШПС_{ВД} с роторными составляющими 1РНД и 1РВД отмечено и при выполнении пилотажной фигуры «колокол».

Как можно видеть из спектра на рис. 2, а, рассчитанного в верхней точке фигуры на высоте 1,5 км при скорости 68 км/ч (см. рис. 2, б), интенсивность ШПС_{ВД} близка к интенсивности составляющих 1РНД и 1РВД при доминировании сепараторной составляющей межроторного подшипника МРС. Заметим, что указанное доминирование наблюдалось при постоянстве частот вращения роторов в узкой зоне минимальных скоростей вблизи геометрической вершины траектории «колокола».

Составляющие, генерируемые телами качения подшипников, важный диагностический признак их состояния. В процессе проведения подконтрольной эксплуатации обследуемого двигателя с использованием широкополосного вибросигнала в штатном месте измерения вибраций устойчиво фиксировались составляющие МРТК, ШП_{ТКВД} и ШП_{ТКНД}. Значимый уровень составляющей МРТК иллюстрируется рис. 3, на котором показан спектр штатного вибросигнала, рассчитанный для установившегося режима $N1/N2 = 76\%/82,4\%$ после запуска двигателя с авторытацией ($H = 6$ км, $V_{пр} = 400$ км/ч).

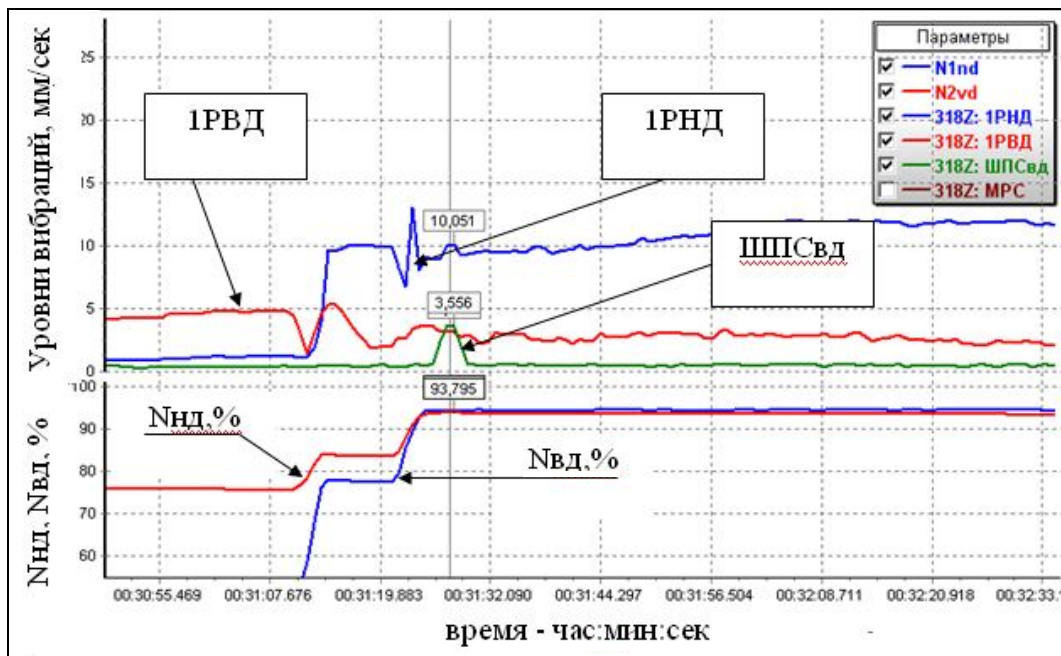


Рис. 1. Изменение по времени амплитудных значений составляющих ШПС_{ВД}, а также 1РНД и 1РВД при выходе двигателя на максимальный режим в полете на высоте $H = 8$ км, при $V_{пр} = 480$ км/ч

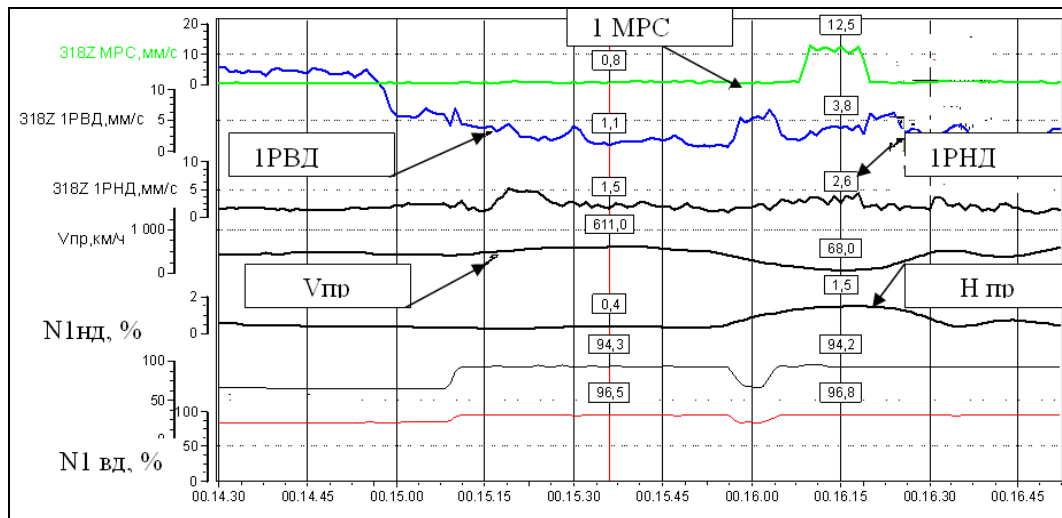
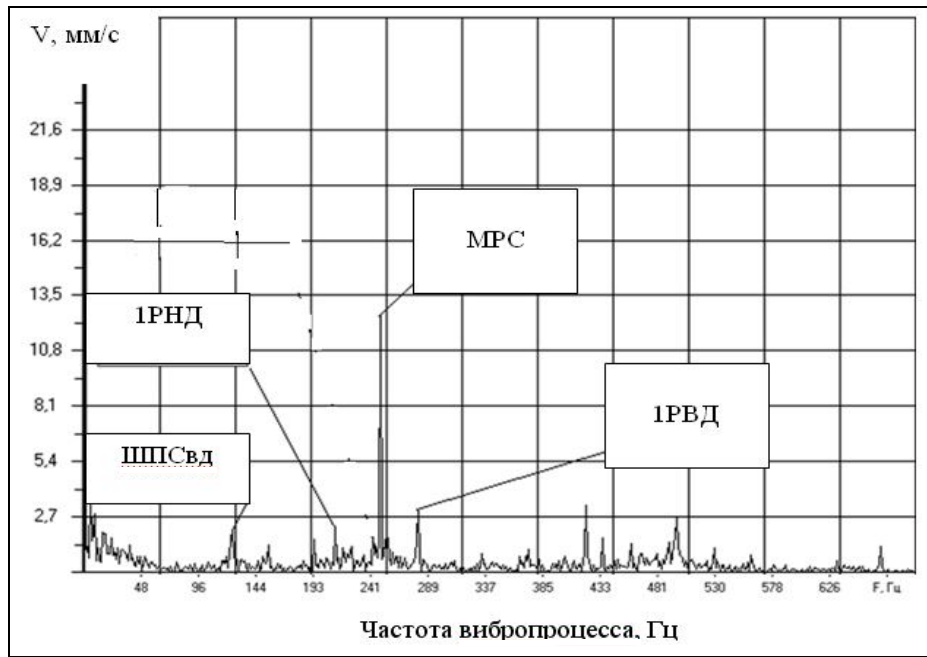


Рис.2. Проявление составляющих вибрации MPC и SHPSVD при выполнении пилотажной фигуры «колокол»

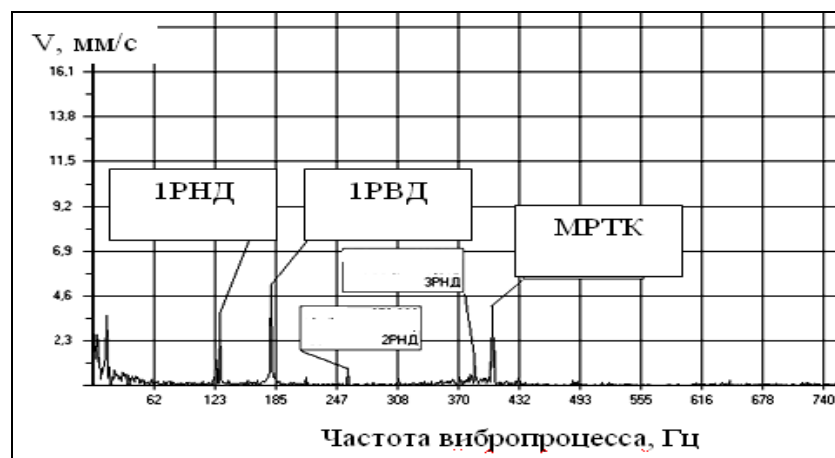
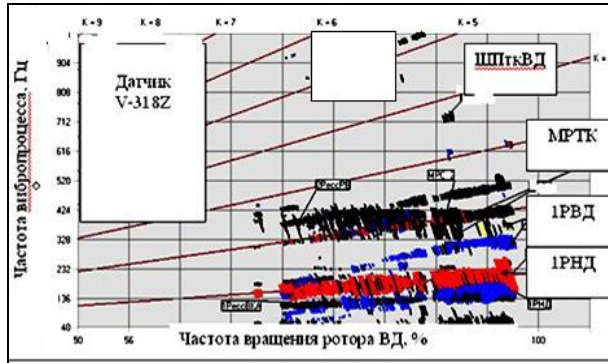


Рис.3. Иллюстрация проявления в спектре вибросигнала значимой составляющей MPTK ($H=6$ км, $V_{пр}=400$ км/ч, $N1/N2 = 76 \% / 82,4 \%$)

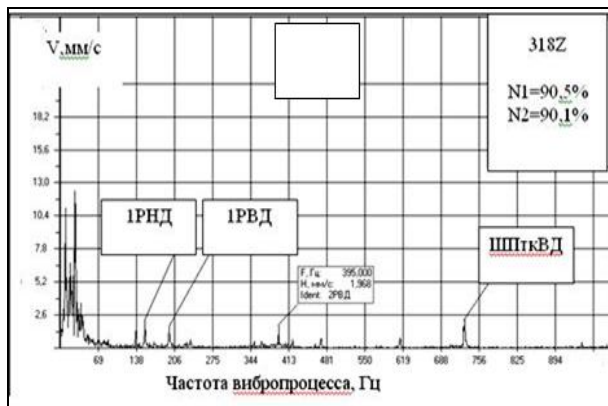
При выполнении самолетом управляемого штопора на режиме работы двигателя

$$N1 \approx N2 \approx 90\% \text{ (рис. 4)}$$

значимо проявила себя и составляющая вибраций, генерируемая телами качения шарикового подшипника ШП_{ТКВД}.



а



б

Рис. 4. Иллюстрация проявления составляющей вибрации ШП_{ТКВД} на диаграмме Кемпбелла (а) и в спектре вибропроцесса (б) при выполнении управляемого штопора

При выполнении на высоте 6км маневров «перевернутый полет», обеспечивающих достаточно длительное (до10с) пребывание самолета с отрицательной вертикальной перегрузкой $n_y \approx -1,2$ ед.г., отмечены кратковременные пиковые значения амплитуд составляющих МРС, ШПС_{ВД} и ШПВО_{ВД}

Максимальные значения амплитуд обследуемых вибропараметров достигали при этом следующих величин:

- **6,9 мм/с для МРС**

при $N1/N2 = 82,5\%/88,2\%$, $n_y = 1,47$ и интенсивностях вибрации 6,8мм/с для СКЗ, 1,1 мм/с для РНД1, 2,9мм/с для РВД1;

- **1,96 мм/с для ШПС_{ВД}**

при $N1/N2 = 90,7\%/93,3\%$, $n_y = 1,6$ и интенсивностях вибраций 6,0 мм/с (СКЗ, 2,1 мм/с (РНД1), 5,6мм/с (РВД1),);

- **1,5 мм/с для ШПВО_{ВД}**

при $N1/N2 = 89\%/91,8\%$, $n_y = -1,2$, и интенсивностях 4,2 мм/с (СКЗ), 4,0 мм/с (РНД1), 3,6мм/с (РВД1).

Таким образом, при выполнении маневра «перевернутый полет» интенсивность диагностической составляющей МРС в штатном месте измерений вибраций на двигателе кратковременно превышала интенсивность его первых роторных гармоник в 2-6 раз, а интенсивность составляющих ШПС_{ВД} и ШПВО_{ВД} (также кратковременно) была соизмеримой с интенсивностью указанных роторных гармоник.

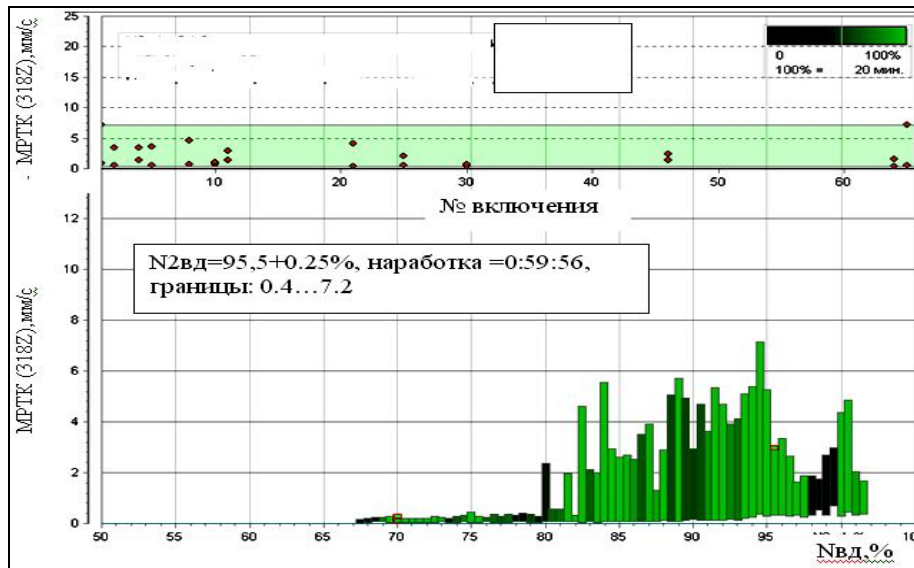
Резюмируя результаты анализа условий проявления обследованных вибрационных диагностических признаков состояния подшипников двигателя при маневрах самолета, можно утверждать, что все они, как правило, возникают кратковременно, нередко имеют значимый уровень и могут наблюдаться вне фаз полета, связанных с большими линейными перегрузками и угловыми частотами вращения планера. Высокая чувствительность к экстремальным изменениям таких параметров выявлена только для вибрационного диагностического фактора состояния радиально упорного подшипника – составляющей вибраций ШПС_{ВД}, «всплески» интенсивности которой четко отслеживали локальные экстремумы параметров n_y и ω_r .

Подобное отслеживание для составляющей ШПС_{ВД} обнаружено и при выполнении самолетом разворотов на больших углах атаки. Оно наблюдалось при даче педали и ручки управления самолетом (РУС) по крену на больших углах атаки, в том числе, на петле.

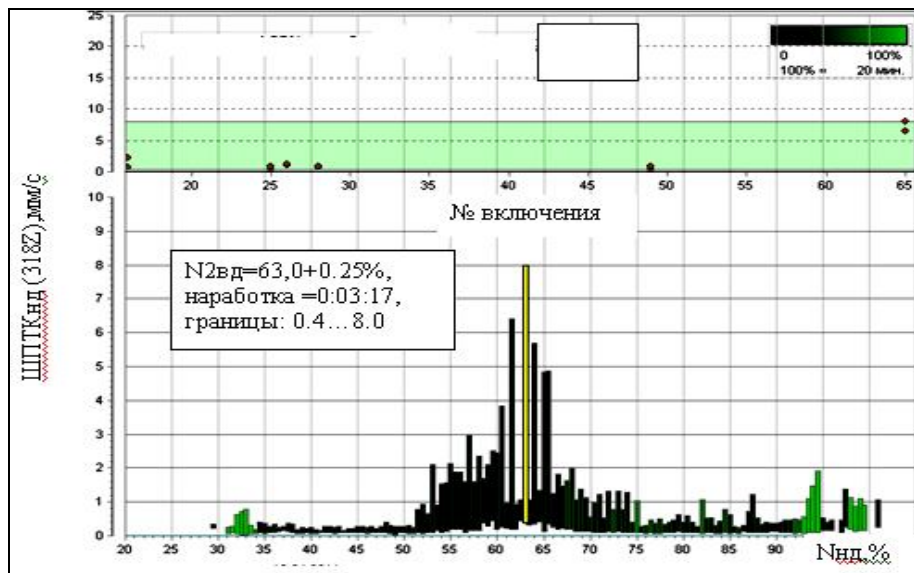
Для каждого из обследованных вибрационных диагностических факторов состояния подшипников МРС, МРТК, ШПС_{ВД}, ШП_{ТКВД}, ШП_{ТКНД}, ШПВО_{ВД} испытываемого ТРДДФ в процессе его подконтрольной эксплуатации предусматривалось автоматизированное получение вибрационных моделей нормально работающего двигателя.

Указанные модели представляют собой графические последовательности пределов зафиксированных в полете максимальных и минимальных значений соответствующего вибропараметра в рабочем диапазоне частот вращения роторов N2/N1 двигателя с шагом 0,5% и уровнями наработки, соответствующих не превышению параметром границ конкретного поддиапазона. Примеры таких моделей, полученных при обработке записей 65-ти полетов представлены на рис. 5.

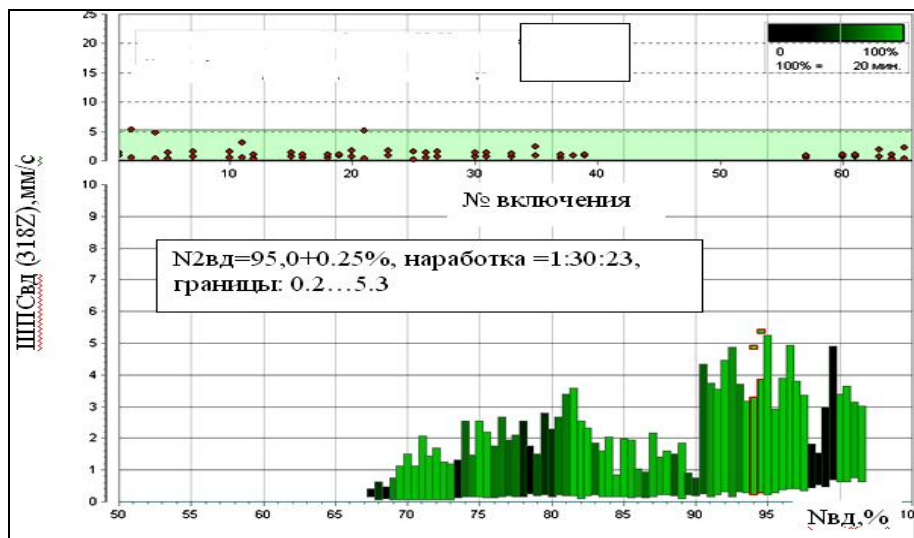
Вышеуказанные модели могут рассматриваться в качестве характеристик, позволяющих на основе натурного эксперимента назначать статистически обоснованные границы изменения конкретного диагностического признака, которые нецелесообразно превышать в эксплуатации.



а

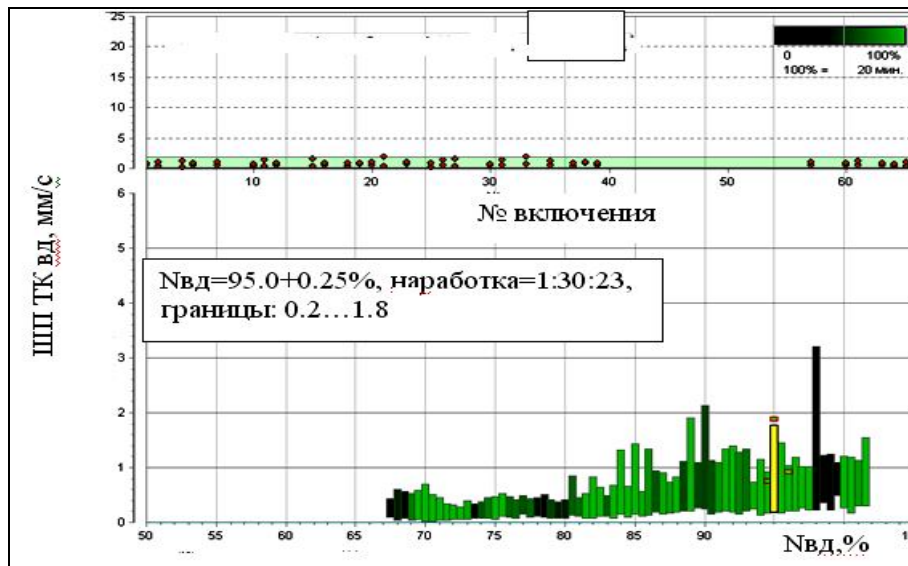


б



в

Рис. 5. Вибромодели двигателя для МРТК (а), ШПТКНД (б), ШПСвд (в) (начало)



Г

Рис 5..Вибромодели двигателя для МРТК (а), ШП_{ТК}НД (б), ШПС_{ВД} (в) и ШП_{ТК}ВД (г) с демонстрацией наработки и конкретных границ MIN-MAX вибропараметров по мере их автоматического включения в выделенный поддиапазон (окончание)

Заключение

1. Использование широкополосного вибросигнала в штатном месте измерения вибраций ТРДДФ маневренного самолета, позволило оценить проявление в эксплуатационных условиях вибрационных диагностических признаков состояния не только межроторного роликового, но и радиально упорных шариковых подшипников двигателя.

2. Все обследованные вибрационные диагностические признаки состояния подшипников ТРДДФ в условиях работы на маневренном самолете, как правило, возникают кратковременно, нередко имеют значимый уровень и могут наблюдаться вне фаз полета, связанных с большими линейными перегрузками и угловыми частотами вращения планера.

3. Показана возможность кратковременного доминирования в спектре вибросигнала исправного двигателя сепараторных составляющих вибраций, генерируемых межроторным и радиально упорным шариковым подшипником передней опоры ротора ВД.

4. Полученные результаты могут быть использованы при отработке и уточнении алгоритмов эксплуатационного контроля состояния двигателя и его подшипников по вибросигналу.

Литература

1. Назаренко, Ю.Б. Диагностика роторов и межроторного подшипника по виброскоростям на корпусах двухвальных турбореактивных двигателей. [Текст] / Ю.Б. Назаренко, Л.Ф. Светашова // *Авиационно-космическая техника и технология.* - 2009. - № 9/66. - С. 154 -159.
2. Динамика роторов двухвальных турбореактивных двигателей. Проблемы межроторного подшипника. [Текст] / М.Е. Колотников, Ю.Б. Назаренко, А.В. Иванов, Л.Ф. Светашова // *Научно-технический конгресс по двигателестроению. НТДК. 2008. Десятый междунар. салон: сб. тез.* - М., 2008. - С. 112.
3. Коровин, Б.Б. Виброактивность ТРДДФ с межроторным подшипником в эксплуатационных условиях. [Текст] / Б.Б. Коровин, О.Н. Былинкина, М.Ф. Кузьмин // *Авиационно-космическая техника и технология.* - 2011. - № 9/86. - С. 124 - 133.
4. Былинкина, О.Н. К диагностике состояния межроторного подшипника по вибросигналу. [Текст] / О.Н. Былинкина, Б.Б. Коровин, Е.В. Брычева // *Авиационно-космическая техника и технология.* - 2011. - № 10/87. - С. 127 - 132.
5. Былинкина, О.Н. Программно-аппаратный комплекс для летно-прочностных испытаний авиационных ГТД нового поколения. [Текст] / О.Н. Былинкина, Б.Б. Коровин, А.А. Стасевич // *Авиационно-космическая техника и технология.* - 2005. - № 9/25. - С. 56 - 60.

Поступила в редакцию 1.06.2012

Рецензент: доктор технических наук, начальник сектора И.В. Егоров, ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия.

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЯВЛЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПРИЗНАКІВ СТАНУ
ПІДШИПНИКІВ ТРДДФ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ
НА МАНЕВРОВОМУ ЛІТАКУ**

О.М. Былінкіна, Б.Б. Коровін, А.О. Стасевич

В результаті вібрографування ТРДДФ з міжроторним підшипником в силовій схемі на маневровому літаку з допомогою інтелектуального датчика на гнучкій кераміці, встановленого в штатному місці заміру вібрацій на проміжному корпусі двигуна, оцінені вібрації, генеровані найбільш навантаженими підшипниками двигуна в експлуатаційних умовах. Виявлені умови роботи двигуна, при яких сепараторні складові вібрацій міжроторного роликів і радіально-упорних підшипників домінують в спектрі вібросигналу. Продемонстровані особливості проявлення вібраційних діагностичних ознак стану підшипників при виконанні пілотажної фігури «колокол», в перевернутому польоті, при розворотах літака на великих кутах атаки і в керованому штопорі.

Ключові слова: міжроторний підшипник, радіально-упорний підшипник, вібраційний діагностичний признак, складова спектра, сепаратор, гармоніка, маневровий літак, контроль.

**PECULIARITIES OF VIBRATION DIAGNOSTICS SIGNES MANIFESTATION
FOR AFTERBURNING TURBOFAN BEARINGS WHILE OPERATING
IN HIGH MANEUVERABLE AIRPLANE**

O.N. Bylinkina, B.B. Korovin, A.A. Stasevich

Vibration tests of afterburning turbofan with an intershaft bearing in design was conducted with the help of intellectual flex ceramic pickup mounted in standard engine vibration measurement place. Engine vibration components, excited by bearings in operating conditions of high maneuverable airplane, were appreciated. Engine modes and flight conditions with the bearings separator component predominated in vibration spectrum have being displayed. Peculiarities of vibration diagnostics signes for engines bearings were demonstrated in different flight conditions.

Key words: intershaft bearing, ball bearing, vibration diagnostic sign, spectrum component, separator, harmonic, high maneuverable airplane, monitoring.

Былінкіна Ольга Николаевна – начальник сектора НИО-3 ОАО «ЛИИ им. М.М. Громова», Жуковский, Россия, e-mail: flysim-lii@mtu-net.ru.

Коровин Борис Борисович – доктор технических наук, начальник лаборатории НИО-3 ОАО «ЛИИ им. М.М. Громова», Жуковский, Россия, e-mail: flysim-lii@mtu-net.ru.

Стасевич Аркадий Александрович – ведущий инженер лаборатории НИО-3 ОАО «ЛИИ им. М.М. Громова», Жуковский, Россия, e-mail: flysim-lii@mtu-net.ru.