

# Вибрационная диагностика подшипников авиационного двигателя

Владимир Адаменко, Павел Жеманюк, Виктор Карасев, Игорь Потапов

Описана методика ранней диагностики состояния подшипников ротора турбины высокого давления авиационного двигателя.

## Введение

Подшипниковые опоры авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) относятся к одним из наиболее ответственных узлов, определяющих надежность и ресурс. Проявление развитых дефектов подшипников приводит к значительным затратам на восстановительный ремонт двигателя и другим нежелательным последствиям. В процессе эксплуатации трехвалных ГТД периодически возникает дефект «выкрашивание беговых дорожек» роликоподшипника опоры ротора турбины высокого давления. При этом бортовая система сигнализации о возникновении дефекта по наличию стружки в маслосистеме из-за недостаточной чувствительности и избирательности дает сигнал слишком поздно, на высокой стадии развития повреждения, что исключает возможность устранения неисправности без изъятия двигателя из эксплуатации. В связи с этим была поставлена и решена задача по отработке методики ранней диагностики состояния роликоподшипника. Работа выполнена силами специалистов АО «Мотор-Сич», АО «Вибродиагностика» и НПП «Мера».

## Объект диагностики

На рис. 1 представлен вид поврежденной беговой дорожки наружных обойм роликоподшипников, находящихся в различной стадии развития дефекта. Задачей диагностики было раннее обна-

ружение подшипников с минимальной стадией повреждения, соответствующей показанным на рис. 1а и 1б. Для моделирования условий диагностирования производилась сборка экспериментального двигателя с подшипниками в различной стадии повреждения. Вибро-

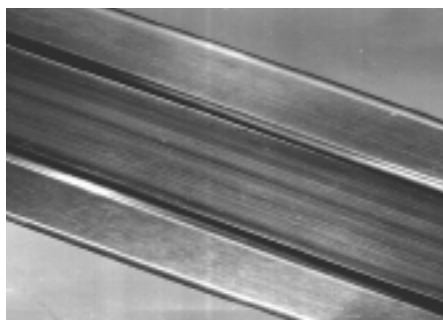


Рис. 1а. Вид поврежденной беговой дорожки наружной обоймы роликоподшипника. Наиболее ранняя стадия: появление рисок

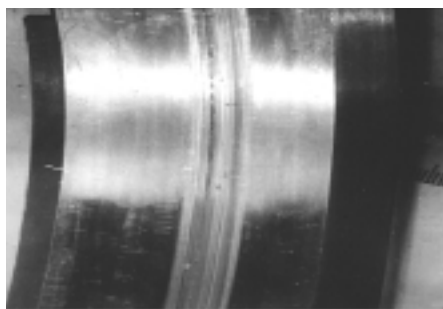


Рис. 1б. Вид поврежденной беговой дорожки наружной обоймы роликоподшипника. Минимальная стадия: появление отдельных участков с микрповреждениями

датчик устанавливался в нижней части наружного фланца корпуса опор турбины высокого давления.

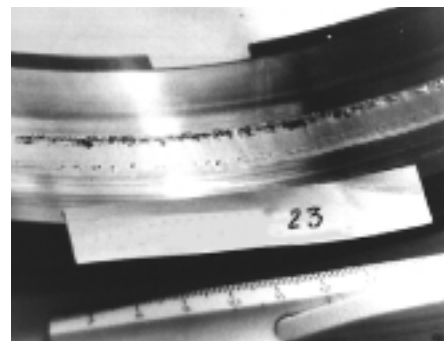


Рис. 1в. Вид поврежденной беговой дорожки наружной обоймы роликоподшипника. Средняя стадия: появление больших поврежденных участков с выкрашиванием



Рис. 1г. Вид поврежденной беговой дорожки наружной обоймы роликоподшипника. Максимальная стадия (нездолго до разрушения): повреждена вся поверхность беговой дорожки

## Оборудование для обработки данных

Для регистрации и анализа вибросигналов использовался портативный программно-аппаратный комплекс «ПОС-ВОЯЖ» (рис. 2), позволяющий выполнять большое количество различных стандартных и оригинальных операций по приему, измерению и обработке данных в цифровом виде. Комплекс разработан научно-производственным предприятием «МЕРА» и ЗАО «I-scard» для использования в стендовых, лабораторных и полевых условиях.

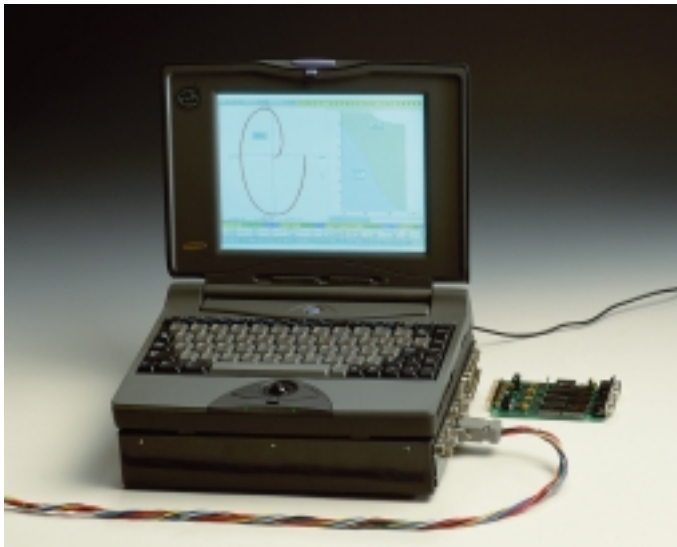


Рис. 2. Портативный программно-аппаратный комплекс «ПОС-ВОЯЖ»

Система содержит

- вибродатчики с блоком согласования аналоговых сигналов;
- кейт с аналого-цифровым преобразователем, процессором цифровой обработки данных, коммутатором, набором программируемых инструментальных усилителей и фильтров ФНЧ;
- переносной IBM PC совместимый компьютер;
- программное обеспечение ПОС (пакет обработки сигналов).

Система обеспечивает ввод, анализ и представление данных в режимах реального времени или с накоплением на жестком диске.

Основное рабочее меню пакета ПОС позволяет (рис. 3) управлять режимами ввода сигнала, архивации и загрузки, визуализации, задавать алгоритмы обработки сигнала (см. Опции), режимы документирования и ввода комментариев.

## Методика и результаты исследований

В процессе вибродиагностических исследований запись вибросигналов проводилась в процессе выбега ротора турбины высокого давления после его ручной раскрутки до достижения частоты вращения около 1,5 Гц.

Вибросигналы, замеренные на корпусе опоры подшипника при различных стадиях развития дефекта беговой дорожки наружной обоймы, регистрировались в темпе ввода на жестком диске персонального компьютера.

Последующая обработка производилась с целью выявления диагностических

признаков, т. е. параметров вибросигнала, чувствительных к наличию и степени развития повреждения.

При этом применялись методы взаимного сравнительного анализа, позволяющие выявить отличия в вибросигналах, соответствующих различным состояниям подшипников, такие как расчет и построение функции некогерентности, не-взаимной части спектра, некогерентной спектральной мощности, разностных спектральных характеристик и др.

Примеры этих характеристик (признаков) представлены на рис. 4. При вращении ротора высокого давления в опорном подшипнике генерируются вибросигналы, спектр частот которых определяется

- конструктивными параметрами диагностируемого подшипника;
- частотой вращения ротора;
- дефектами деталей подшипника.

Распределение энергии вибросигнала по частоте зависит от свойств каналов распространения вибраций от подшипника до вибродатчика, состояния подшипника и отклонений при его изготовлении.

Интенсивность вибросигналов на кратных гармониках в большинстве случаев определяется степенью развития дефектов в подшипниках. Распределение энергии вибросигнала по этим частотам связано со степенью развития повреждения колец. Возможны три вида информативных диагностических частот:

- дискретный ряд частот на кратных гармониках;
- узкополосные или широкополосные спектральные составляющие;
- сочетание первого и второго вариантов.

Таким образом, с учетом приведенных подходов и в результате сравнительного анализа больших объемов данных, состоящих из оцифрованных вибросигналов, были выявлены следующие диагностические признаки:

- признак 1 — среднеквадратический уровень виброускорения вынужденных колебаний в частотном диапазоне 11...17 гармоник (частотная полоса 1) при прокатывании тел качения по наружной обойме;
- признак 2 — среднеквадратический уровень виброускорения колебаний в

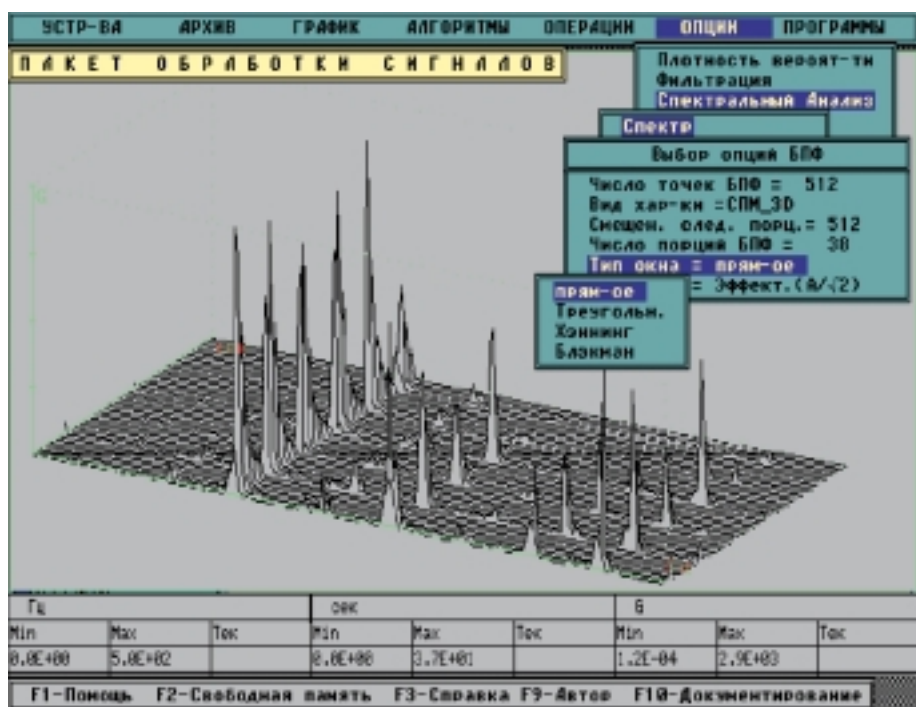


Рис. 3. Основное рабочее меню пакета «ПОС»

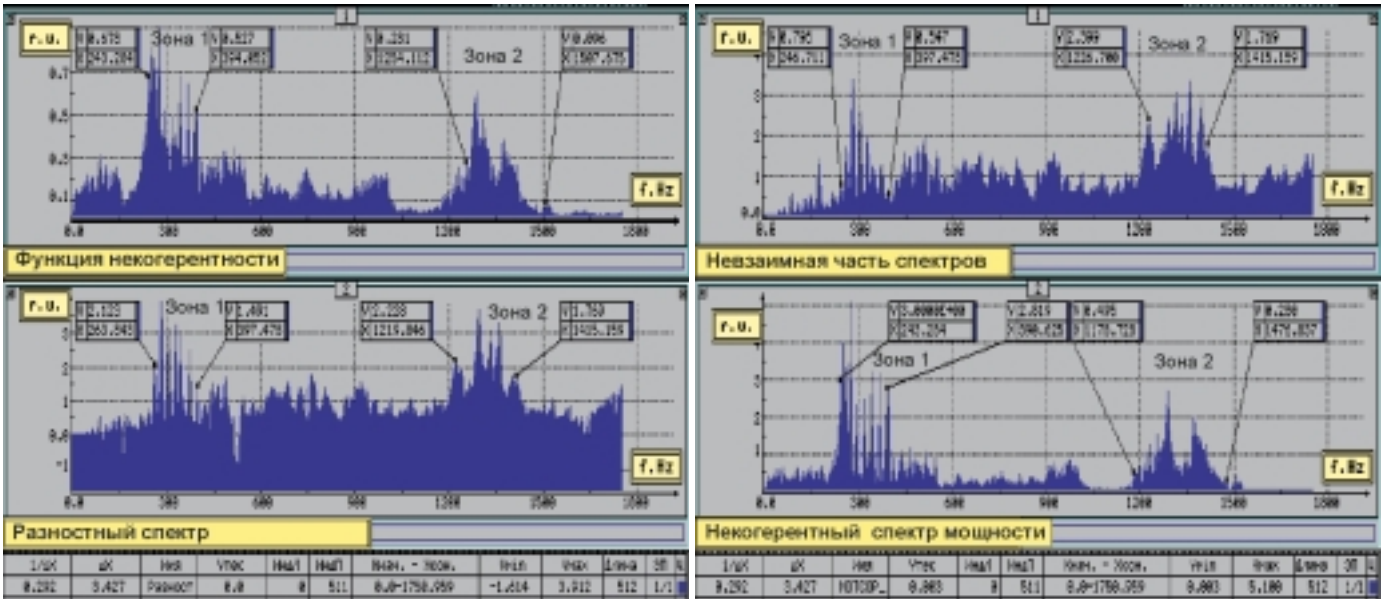


Рис. 4. Выявленные зоны отличий в спектрах вибросигналов подшипников в кондиционном и поврежденном состояниях

диапазоне резонанса (частотная полоса 2) корпуса опоры подшипника;

- признак 3 — среднеквадратический уровень огибающей в частотной полосе 1 сигнала, подвергнутого полосовой фильтрации в частотной полосе 2;
- признак 4 — расчетный, соотношение между признаками 1 и 2.

На рис. 5 представлены результаты расчета диагностических признаков для различных состояний подшипника.

Определение количественных параметров признаков производилось с использованием цифровой фильтрации, пикового детектирования, спектрального анализа, статистического анализа.

При этом производится несколько циклов раскрутки ротора, измерения и обработки сигналов до получения не-

скольких наборов диагностических признаков.

В процессе выполнения работ по диагностированию автоматически создается и пополняется база данных, что позволяет производить текущий анализ и корректировку параметров системы.

### Заключение

Экспертная система завершает свою работу выпуском результирующего протокола, содержащего информацию об объекте диагностирования, состоянии подшипника и рекомендации по действиям с двигателем. Надежность поставленного диагноза — результат следующих особенностей:

- система работает с большими объемами диагностической информации

(около 1 Мбайт оцифрованных вибросигналов);

- диагност основан на использовании семейства диагностических признаков;
- производится статистическое взвешивание измеренных величин;
- выполняется температурная коррекция признаков;
- производится оценка внешних шумов и их исключение из величин признаков (путем измерения «тишины» в процессе исследований);
- обеспечивается автоматический режим ввода, обеспечивающий постоянство оборотов ротора при старте и калибровочных условий (позволяет использовать персонал, не имеющий специальной подготовки).

На первом этапе достоверность диаг-

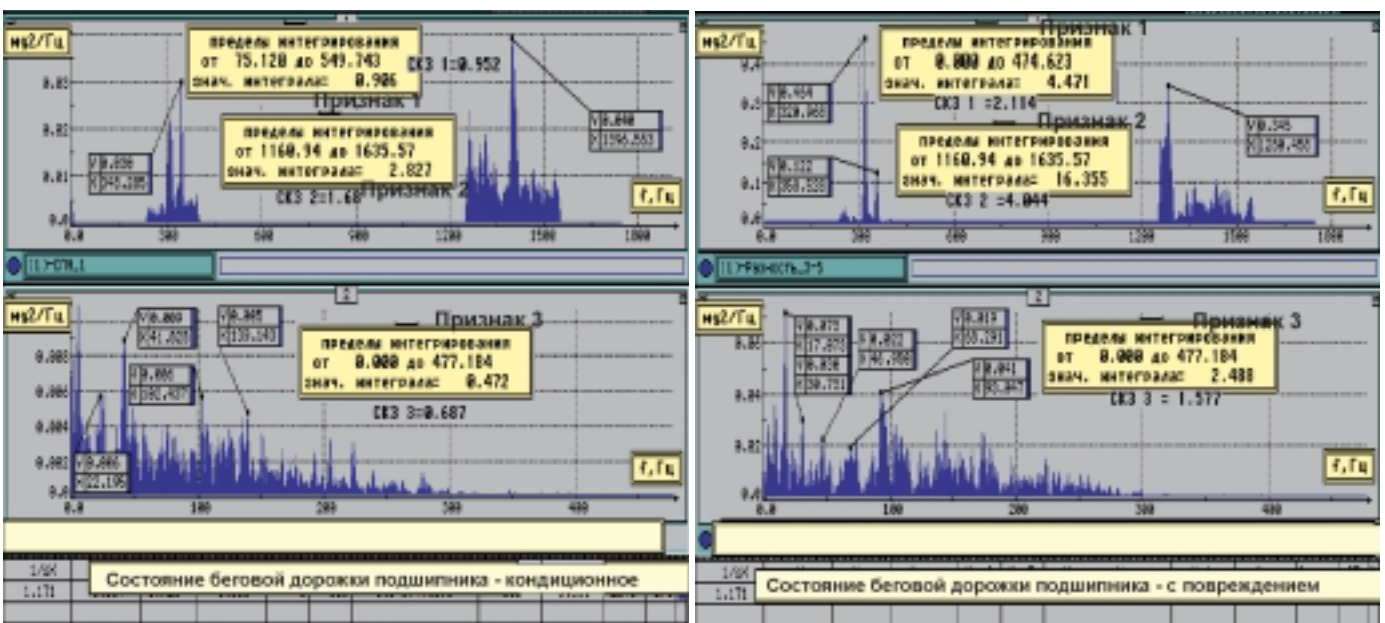


Рис. 5. Результаты расчета диагностических признаков

ноза проверялась путем моделирования различных состояний подшипника в составе опытного двигателя с последующим замером диагностических признаков. Достоверность определения состояния составляла 0,938. После проведения корректировок методики было проведено ее опробование в условиях эксплуатации на двигателях в составе самолетов. Количество проведенных обследований — 43. При этом практически во всех случаях диагноз «Недопустимое выкрашивание беговой дорожки» был подтвержден разборкой двигателя и дефектацией подшипника в условиях завода-изготовителя. Указанные работы выполнены на 5 двигателях.

Кроме того, подшипники с двигателями, поступивших на завод для ремонта по выработке ресурса или по другим причинам, но имевших диагноз «Подшипник кондиционный», также подвергались дефектации, которая во всех случаях его подтверждала. Такое обследование выполнено на 4 двигателях. По окончании опробования начаты и по

настоящее время продолжают работы по проведению диагностирования на всем парке самолетов. В настоящее время проведено 123 обследования на 83 двигателях. По результатам диагностирования произведена замена подшипника или отстранение от эксплуатации 8 двигателей. Во всех случаях дефектация подшипника подтверждала диагноз, т. е. необоснованных съёмов двигателей не было. Кроме того, отсутствуют случаи появления дефектов на подшипниках с диагнозом «Кондиционный». Однако некорректно было бы утверждать, что вероятность достоверного диагноза равна 1,0, а вероятность ошибки сведена к нулю. Это определяется природой возникновения и проявления вибрационного возмущения, носящего, как правило, случайный характер. Учитывая малый объем статистических данных, выполнить количественную оценку вероятностей достоверного и ошибочного диагнозов не представляется возможным, однако при назначении предельно допустимой величины диагностическо-

го критерия закладывалась нулевая вероятность риска ошибочного пропуска двигателя с дефектом, а вероятность получения заключения о наличии дефекта на кондиционном подшипнике 0,025.

Проведенные работы по диагностированию подтвердили высокую эффективность применяемого метода и оборудования для безразборной диагностики состояния подшипников качения в условиях эксплуатации. Экономическая эффективность диагностики не вызывает сомнений, так как только на стоимости ремонта двигателя с дефектным, своевременно выявленным подшипником экономится около 1 млн. USD. В настоящее время обследование состояния подшипников успешно продолжается. ●