УДК 621.01

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИЙ КАК СРЕДСТВО РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

А.Г. Соколова, Ф.Я. Балицкий [1)], Ю.В. Брусиловский, И.В. Минкин, А.В. Изотов [2)], С.А. Вишняков, О.В. Морозов [3)]

В работе представлены материалы разработки программного комплекса дискриминантного анализа вибраций газотурбинных установок (ГТУ) для целей вибромониторинга, раннего обнаружения эксплуатационных повреждений и диагностики неисправностей подшипниковых узлов установки по результатам измерений вибросигналов, находящихся в базе данных системы диагностирования компрессорного оборудования (СДКО-1 и СДКО-2).

Актуальность данной разработки диктуется необходимостью обеспечения заблаговременного обнаружения отклонений в работе критического машинного оборудования до наступления аварийной ситуации, связанной с выходом из строя элементов оборудования, недоступных для контроля с помощью штатной заводской системы виброконтроля.

Несмотря на то, что вибродиагностика роторного оборудования применяется уже достаточно давно, технология вибромониторинга и вибрационной диагностики ГПА с газотурбинными установками на основе судовых, и, в особенности, авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), имеет определенные сложности и значительным образом отличается от диагностики роторных механизмов других типов. Дело в том, что мощные высокооборотные ГТД, конвертированные к наземным условиям эксплуатации на компрессорных станциях (КС), не отвечают требованиям контролепригодности, поскольку по условиям проектирования данных двигателей предусматривалась установка на борту только системы аварийной защиты. Использование же в бортовых условиях стационарных систем непрерывного контроля и диагностики с установкой вибродатчиков в непосредственной близости от подшипниковых узлов, наиболее подверженных деградационным процессам, считалось нецелесообразным, поскольку решение проблемы обнаружения неисправностей машинного оборудования ГТД любыми возможными методами возложено на наземные диагностические службы в межэксплуатационый период.

К особенностям диагностирования конверсионных ГТД в наземных условиях КС с помощью стационарных систем сбора и обработки информации, существенно осложняющих процедуру диагностирования и снижающих достоверность диагноза

относятся следующие факторы:

- удаленность мест установки вибродатчиков (на корпусных конструкциях) от подшипниковых узлов двигателя;
- подверженность температурной деформирации и анизотропность корпусных конструкций;
- высокая нестабильность оборотно-нагрузочных режимов;
- традиционная ориентация разработчиков систем виброконтроля типа СДКО на низкочастотную информацию, содержащуюся в сигналах виброскорости в диапазоне частот вращения роторов;
- использование в диагностических целях в качестве источников информации сигналов виброскорости корпусных конструкцийв диапазоне частот до 4.0 кГц;
- особенности кинематической схемы и динамических процессов в двигателе, приводящих к возбуждению большого количества гармонических составляющих вибрации, генерируемых различными узлами и деталями ГТУ на близких частотах или с наложением частот.

Перечисленные факторы делают малоэффективным обычный спектральный анализ сигналов виброскорости и невозможным использование традиционных для обычных роторных машин методов обнаружения и диагностики эксплуатационных повреждений таких узлов ГТУ как подшипники качения, базирующихся, как правило, на применении метода амплитудной демодуляции высокочастотной вибрации, неприменимого к измеряемым вибросигналам на корпусе ГТУ.

В результате проведения предварительных исследований эффективности дискриминантного*) анализа вибраций при обнаружении и отслеживания развития деградационных процессов в узлах машин и механизмов общего машиностроения [1] и апробации данного метода на ГТУ с приводом от судового ГТД ДГ-90 [2-3], было принято решение о разработке программного комплекса дискриминантного анализа, автоматически подсоединяющегося к базе данных с накопленными измерениями вибрации.

На сегодняшний день, данный программный модуль установлен на одном из объектов Газпрома (ООО «Ямбурггаздобыча», компрессорная станция ДКС-1, вторая очередь) и проходит опытную эксплуатацию.

1.Технические характеристики программного комплекса

1.1.Назначение программы. Программа виброконтроля ГТУ и подшипников агрегатов ГПА-16С позволяет с использованием вибрационных данных, собранных системами СДКО-1 и СДКО-2 с частотами дискритизации, соответственно, 19.2 кГц и 10.0 кГц, на временном интервале N=8192 отсчета и параметрах обработки, заданных оператором, произвести диагностический анализ вибраций в штатных точках корпуса газоперекачивающего агрегата и выдать заключение о наличии и возможном развитии неисправностей узлов установки. Программный комплекс реализует обсчет выборки вибрационных данных методом анализа S-дискриминанта с использованием программ предварительной обработки сигналов: дифференцирования, низкочастотной (НЧ) и полосовой фильтрации (ПФ), а также спектрального анализа исходных и преобразованных вибросигналов методом быстрого преобразования Фурье (БПФ).

*) – Особенности метода дискриминантного анализа вибраций представлены в статье А.Г.Соколовой, Ф.Я.Балицкого «Вибромониторинг машинного оборудования и раннее обнаружение эксплуатационных повреждений».

Применительно к техническим возможностям СДКО, программный комплекс позволяет выявить наличие дефектов линии вала компрессора и проследить за их развитием в процессе эксплуатации по данным измерения виброскорости в зоне оборотных частот, выявить развитие деградационных процессов в подшипниках качения ГТУ по данным измерения виброускорения в зоне возбуждения подшипниковых частот.

1.2. Языки программирования. Программа написана на языке **C++** с использованием компилятора **Borland C++Builder 6.0.** Для обработки цифровых сигналов в реальном времени использовались библиотеки Mitov Software с реализацией не рекурсивных цифровых фильтров.

1.3.Требования к программным и аппаратным средствам. Для установки и эксплуатации программы на персональном компьютере должна быть предварительно установлена одна из следующих операционных систем:

- Microsoft Windows 2000 SP4;
- Microsoft Windows XP SP1, SP2.

Персональный компьютер должен удовлетворять следующим минимальным аппаратным требованиям:

- Процессор с тактовой частотой не ниже 500 мГц;
- ОЗУ не менее 256 Мб (для Windows Me), 512 Мб (для Windows 2000 и Windows XP);
- Свободное место на жестком диске – не менее 250 Мб;
- Видеосистема с разрешением не менее 1024x768 (16M цветов).

Дополнительно на компьютер требуется установить MSDE 2000. Дистрибутив идет в комплекте с программным комплексом.

2. Краткий обзор возможностей программы.

2.1. Вид исходной информации. Программа позволяет импортировать и обрабатывать временные реализации вибросигналов, хранящиеся в базах данных (БД) следующих систем сбора:

- СДКО-1 (с программным комплексом последующей обработки информации «Мимоза») - сигналов виброускорения с длительностью реализации 8192 отсчета, сформированных с частотой дискретизации 19.2 кГц;
- СДКО-2 (с программным комплексом последующей обработки информации «Вибродизайнер») - сигналов виброскорости с длительностью реализации 8192 отсчета, сформированных с частотой дискретизации 10.0 кГц.

2.2. Блок-схема. На рис.1 представлена блок-схема программы расчета S-дискриминанта в системе обработки вибросигналов, измеренных в штатных точках ГПА с помощью системы СДКО-1 или СДКО-2.



Рис.1

2.3. Виды преобразований и обработки вибросигналов. Над временными реализациями вибраций в выбранной измерительной точке объекта в процессе работы возможны следующие операции:

- Изменения амплитуды в момент импорта реализации из БД;
- Дифференцирование;
- Разбиение исходной реализации на несколько реализаций для последующего усреднения результатов счета;
- НЧ-фильтрация;
- ПФ-фильтрация;
- БПФ-преобразование исходного и преобразованного сигналов;
- Расчет статистических характеристик преобразованного вибросигнала: математического ожидания, дисперсии, стандартного отклонения;
- Формирование порога клиппирования сигнала;
- Расчет эталонных параметров клиппированных вибросигналов;
- Расчет S-дискриминанта Id по дисперсии клиппированного сигнала при заданном пороге клиппирования P для данных на выбранном временном интервале эксплуатации ГПА с занесением результатов расчета в таблицу;
- Представление результатов проекта расчета дискриминанта в графической форме.

2.4. Дополнительные возможности программы. Программа позволяет также:

- В процессе работы с программой возможно удаление или добавление реализаций при расчете эталона с полным перерасчетом данных;
- Удаление заведомо ложной и добавление новой текущей информации о вибросигналах;
- Сохранение проекта в файле формата XML;
- Полный перерасчет S-дискриминанта при измененных параметрах расчета (коэффициента усиления сигнала, количества разбиений временной реализации, полосы анализа, порога клиппирования);
- Визуализация графика S-дискриминанта;
- Визуализация графиков временных реализаций и спектров исходных и преобразованных вибросигналов;
- Сохранение табличных и графических данных в PDF-формате;
- Формирование итогового отчета.

3. Дискриминанты как инструмент экспертной оценки состояния узлов ГПА

Одним из примеров, иллюстрирующих возможность раннего обнаружения развития неисправности ГТУ с помощью дискриминантного анализа, приведен на рис.2. Данные отображают результат развития повреждений дорожек качения роликового подшипника газогенератора ГПА-3 КС «Смоленская» с приводом от авиационного двигателя ПС-90. Дискриминант Id (при пороге клиппирования $P=1.5\sigma_n$) получен для сигнала виброскорости в штатной измерительной точке корпуса Кз-верт в полосе частот 0-4.0 кГц, т.е. без предварительного преобразования вибросигнала. Существенное отклонение значений Id от единицы, означающее уход параметров технического состояния двигателя от эталонного, сформированного по данным измерений от 14-15.02.06, наблюдается уже 25-26.04.06 (Id≈14), следующий подъём значений дискриминанта (Id≈29) наблюдается 07.05.06. Этот подъём совпал с появлением стружки в масле на сливе роликового подшипника газогенератора, после чего двигатель был остановлен для промывки масляной системы. Максимального же значения дискриминант достигает 11.05.06_13:43 (Id≈35), что по времени совпадает со вторичным появлением стружки в масле. Данное событие явилось основанием для остановки двигателя и отправки его в ремонт. Причиной останова двигателя, как оказалось, были повреждения тел и дорожек качения роликового подшипника газогенератора компрессора высокого давления.

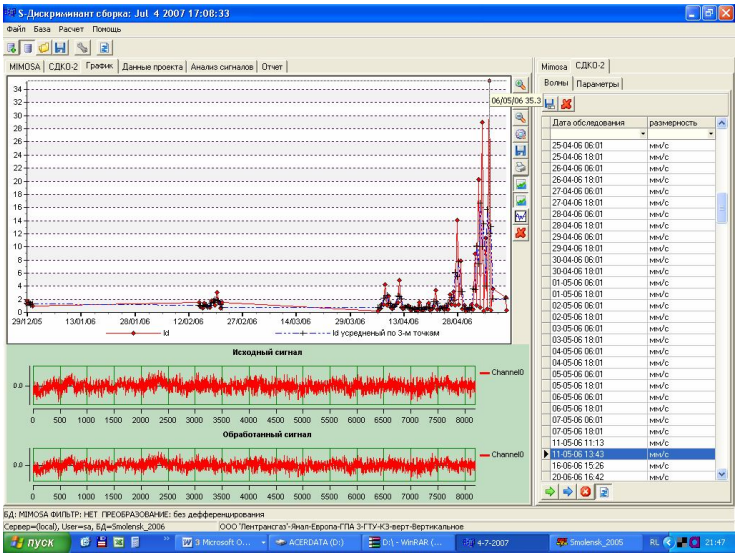


Рис.2.

Тем не менее, если сравнить спектры виброскорости для эталонного (от 14.02.06) и дефектного от (07.05.06) состояний (см. рис.3 и 4), можно заметить, что не столько подшипниковые частоты определяют энергию

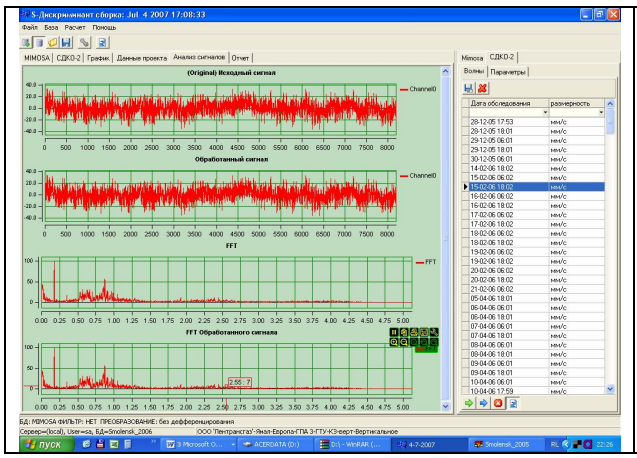


Рис.3.

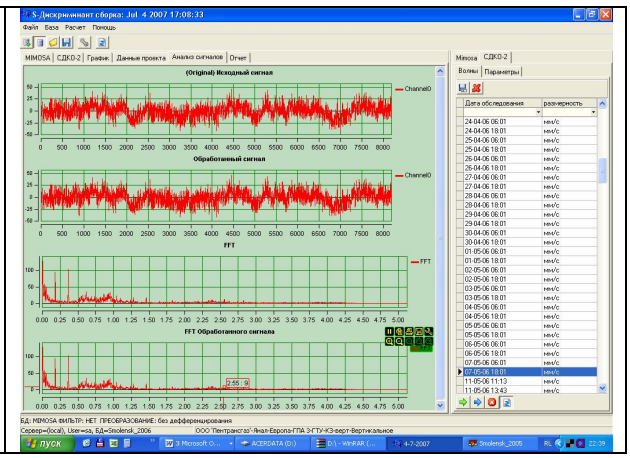


Рис.4.

сигналов виброскорости в данной полосе частот (0-4.0кГц), сколько гармоники частоты вращения ротора компрессора, т.е. по данным дискриминантного и спектрального видов анализа можно сделать заключение о том, что причиной повреждения элементов роликового подшипника является искривление линии вала, (возможно, перекос валов компрессора и турбины, соединенных между собой шлицевой муфтой).

Действительно, результаты дискриминантного анализа сигналов виброускорения в т. ТГГ-гор в полосе частот проявления дефектов наружного и внутреннего колец подшипника (2150-2950 Гц) демонстрируют положительную реакцию дискриминанта на развитие деградационных процессов в подшипнике (см.рис.5). О том же говорят и узкополосные спектры виброускорения для эталонного и дефектного (от 07.05.06) состояний подшипника, представленные на рис. 6 и 7, где амплитуда вибраций на частоте локального повреждения внутреннего кольца роликового подшипника возросла почти в 5 раз по сравнению со значением в эталонном состоянии.

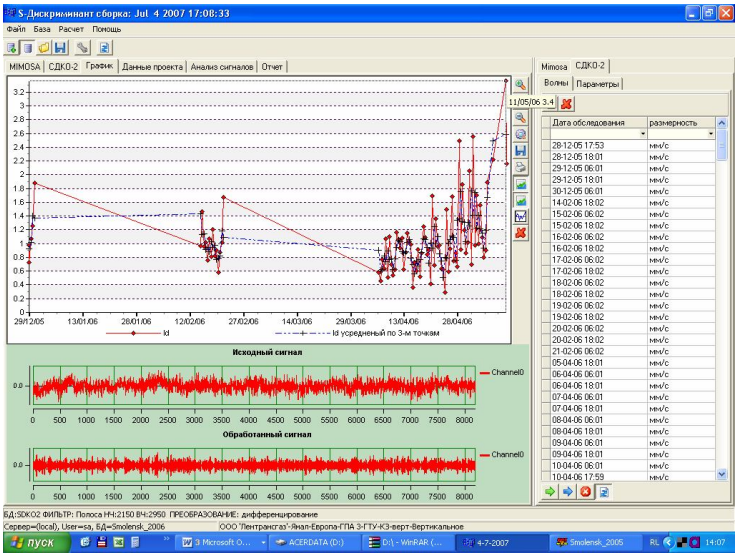


Рис.5.

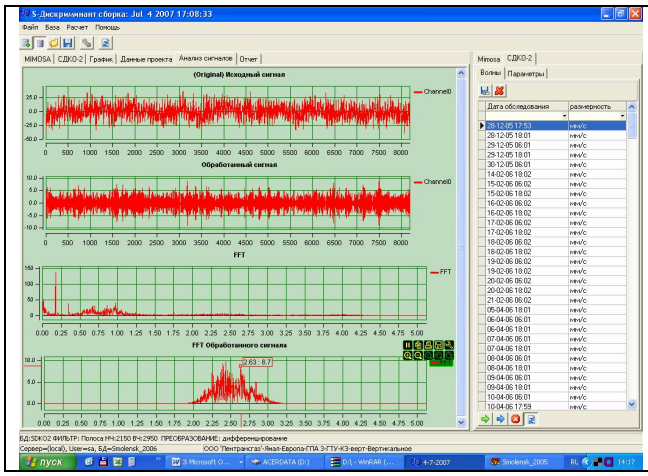


Рис.6.

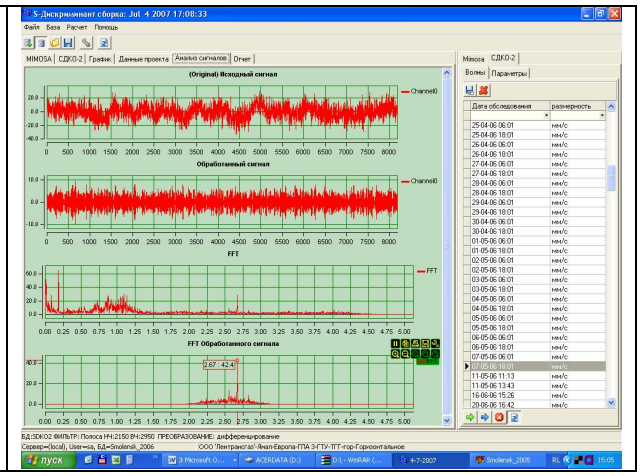


рис.7.

Литература

1. Соколова А.Г. Алгоритм вибромониторинга машинного оборудования с адаптацией к базовому состоянию / Контроль. Диагностика № 11, 2005. С. 30 – 40.
2. Соколова А.Г., Пичугин К.А., Минкин И.В. Практическое применение нового метода вибромониторинга и диагностики машин к ГТД ДГ-90. Использование дискриминантного анализа вибраций для диагностики дефектов газотурбинных установок на основе данных СДКО / Диагностика оборудования и трубопроводов компрессорных станций / Материалы XXIV тематического семинара, т.1, Геленджик, 6-11 сентября 2005 г. С.94-104.

3. Соколова А.Г., Иванова М.А., Долаберидзе Г.В., Пичугин К.А. Балицкий Ф.Я., Брусиловский Ю.В., Минкин И.В. Обнаружение дефектов подшипников промежуточной опоры ГТУ ДГ-90 по результатам дискриминантного анализа высокочастотной вибрации с использованием СДКО» / Диагностика оборудования и трубопроводов компрессорных станций / Материалы XXV юбилейного тематического семинара, т.1, Туапсе, 6-11 сентября 2006 г. С.94-104.

Институт машиноведения РАН [1)]
ОАО «Газпром» ДОАО «Оргэнергогаз» ИТЦ «Оргтехдиагностика» [2)]
ООО «Турбоконтроль» [3)]

Поступила: 15.05.08.