

УДК 681.518.5, 629.7.036

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МАШИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© А.А. Серов, Г.В. Долаберидзе, М.А. Иванова, А.Г. Соколова,  
Ю.В. Власишен

Учреждение Российской академии наук Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
РАН, Москва, Россия  
[agsokolova@gmail.ru](mailto:agsokolova@gmail.ru)

***Аннотация.** Работа посвящена проблеме автоматизации мониторинга машинного оборудования. Представлены данные о программном комплексе, основанном на реализации метода S-дискриминантов и предназначенном для виброакустического мониторинга. Приведены общие сведения о наборе методов, положенных в основу программного комплекса и их реализации в программном обеспечении. Представлена информация об использовании программного обеспечения для контроля технического состояния газотурбинных двигателей.*

***Ключевые слова:** виброакустика, дефект, диагностика, дискриминант, мониторинг, машинное оборудование, программное обеспечение, спектр.*

**1. Введение.** Задачи контроля технического состояния оборудования являются в настоящее время одними из наиболее актуальных задач, которые стоят перед современной технологической наукой. С одной стороны, это связано с постоянным увеличением степени сложности конструкций контролируемого оборудования, использованием новых материалов и технологий изготовления. С другой стороны, эта актуальность определяется постоянным увеличением степени сложности методов, используемых при контроле и соответствующими этому изменениями в оборудовании и программном обеспечении систем, предназначенных для решения задач контроля. Современные программно-аппаратные комплексы, ориентированные на вибромониторинг технического состояния машинного оборудования, могут быть охарактеризованы следующими общими чертами:

- Широкое использование технологии цифровой обработки данных, применяемой, в том числе и при оперативном анализе больших объемов информации.
- Использование методов спектрального анализа, уже ставшее в настоящее время стандартом при построении систем контроля во всех областях применения этих систем.
- Использование методов многопараметрического статистического анализа, являющегося в настоящее время не только базисом для выбора корректных подходов к проведению анализа, но и основой для поиска новых способов выявления закономерностей в исследуемых системах.
- Использование прогностических методов, позволяющих выявлять тенденции в изменении основных технических характеристик обследуемого оборудования.
- Комплексное использование данных, поступающих от нескольких подсистем контроля, работа которых основана на различных физических принципах.

Сама постановка современных проблем анализа состояния оборудования в последнее время претерпевает все большие изменения. Ужесточение требований к достоверности результатов проводимого контроля и к интервалу времени, необходимому для получения диагностического заключения, обуславливаются несколькими причинами. Современное использование систем контроля машинного оборудования в общем случае направлено на

снижение затрат на эксплуатацию этого оборудования. Проведение технического обслуживания по критериям состояния оборудования позволяет повысить экономичность процесса эксплуатации. Кроме этого, применение автоматизированных систем мониторинга позволяет ввести численные характеристики, которые непосредственно могут быть использованы при планировании процесса эксплуатации.

Прогресс в развитии систем мониторинга состояния машинного оборудования ставит задачи повышения требований к уровню знаний и подготовки эксплуатирующего персонала. Необходимость минимизировать время принятия решения об эксплуатации объекта контроля, а также существующее в настоящее время отставание уровня подготовки специалистов от общих требований, выдвигают на передний план задачи максимальной автоматизации анализа данных, поступающих от контролируемого объекта.

Одним из наиболее перспективных направлений в области контроля технического состояния машинного оборудования является виброакустика [1]. К основным преимуществам виброакустических методов следует прежде всего отнести возможность использования неразрушающих методов бездемонтажной оценки технического состояния машинного оборудования при построении как стационарных, так и мобильных систем. Широкий частотный и динамический диапазоны сигнала, в совокупности с высокой чувствительностью вибросигнала по отношению к изменению технического состояния машинного оборудования дают возможность реализации высокоэффективных методов вибромониторинга состояния, раннего обнаружения эксплуатационных повреждений и диагностики неисправностей контролируемого оборудования.

С одной стороны высокий уровень информативности виброакустического сигнала предоставляет возможность проведения детализированной диагностики с отслеживанием динамики изменения технического состояния объекта контроля. С другой же стороны этот факт приводит к повышенным требованиям по отношению к методам обработки виброакустического сигнала, которые способны дать достоверную оценку техническому состоянию оборудования [2]. Высокий уровень сложности конструкции контролируемого оборудования приводит к тому, что одинаковые типы эксплуатационных дефектов даже однотипного оборудования имеют достаточно различные проявления в виброакустическом сигнале. Это является одной из причин того факта, почему в целом диагностика машинного оборудования относится к классу задач с трудно алгоритмизируемыми способами решения.

Задачи оценки параметров технического состояния оборудования условно могут быть разделены на следующие три основных класса, различие между которыми состоит как в преследуемых целях, так и в средствах, используемых для их достижения: мониторинг, диагностика и прогнозирование изменений технического состояния объекта.

Состав комплекса задач, решение которых возлагается на систему вибромониторинга, в общем случае зависит как от архитектуры, так и от особенностей назначения диагностического программно-аппаратного комплекса, частью которого и является система мониторинга [3]. К наиболее общим требованиям, выдвигаемым по отношению к системе мониторинга, следует отнести автоматизацию измерений и обработки результатов этих измерений, высокий уровень чувствительности используемых методов к изменению технического состояния объекта контроля и возможность обнаружения дефектов на как можно более ранней стадии их развития.

Проведение обработки результатов измерений в режиме реального времени, которое также является одним из наиболее общих требований к построению систем мониторинга, существенно сужает набор методов, которые могут быть использованы при анализе. Следствием этого является подход, основанный на обнаружении системой мониторинга таких изменений виброакустического сигнала, причиной которых может являться возникновение нового дефекта или прогрессирование степени развития уже существующего дефекта. Основной задачей системы мониторинга в таком случае может являться выявление

соответствующего инцидента, возникшего при работе контролируемой системы и передача информационного сообщения в систему управления диагностического комплекса.

Данная работа посвящена обзору основных возможностей программного обеспечения Discriminant, которое предназначено для решения задач автоматизации мониторинга технического состояния машинного оборудования и может быть использовано в качестве ядра для построения системы виброакустической диагностики.

**2. Общие сведения о программном обеспечении и методах, положенных в его основу.** Идеологической основой для построения программного комплекса явился многополосный метод S-дискриминантов, разработанный коллективом Лаборатории виброакустической диагностики машин Института Машиноведения РАН. В качестве численных параметров, на основе исследования изменения которых может быть сделан вывод об изменении технического состояния оборудования, выступают величины S-дискриминантов различных порядков. Вычисление их значений осуществляется в параллельном режиме в нескольких узких полосах частот вибросигнала.

Хорошо известно, что использование нескольких альтернативных методов анализа способно существенно повысить достоверность результатов решения задачи постановки диагноза. С целью повышения достоверности результатов мониторинга технического состояния оборудования, в рамках представляемого программного комплекса используется несколько различных методов обработки экспериментальных данных.

Программное обеспечение Discriminant дает возможность использования средств, автоматизирующих следующий набор методов анализа результатов виброакустических измерений:

- Метод S-дискриминантов, реализующий многополосный анализ клиппированных по амплитуде вибросигналов и применяемый для раннего обнаружения изменений в исследуемом вибросигнале.
- Методы спектрального анализа, применяемые для исследования спектральных характеристик вибросигнала в предварительно заданных диапазонах частот.
- Методы статистического анализа, применяемые для исследования основных статистических характеристик временной реализации вибросигнала, к числу которых относятся математическое ожидание, дисперсия, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса и другие статистические параметры.
- Методы исторического анализа, применяемые для исследования изменения вычисленных характеристик с увеличением времени наработки обследуемого оборудования.

Следует отметить, что в программном обеспечении реализована методология совместного, совокупного использования всех перечисленных методов при решении задачи выявления изменений в виброакустическом сигнале. При использовании программного обеспечения это позволяет осуществлять вибромониторинг, не ограничиваясь рамками какого-либо одного из методов анализа.

**3. Состав основных модулей программного обеспечения, их назначение и особенности реализации.** Разработка архитектурного решения программного комплекса вибромониторинга была основана на идеологии создания открытых систем. С одной стороны, при разработке учитывалась необходимость реализации полного цикла хранения и обработки данных, а также сохранения результатов проведенных исследований. С другой стороны, при разработке принималась во внимание возможность будущей адаптации создаваемой системы под задачи информационного обмена с аппаратно-программными средствами систем регистрации виброакустических данных. В рамках разработки принимался также во внимание вопрос о возможности будущего расширения

функциональности программного комплекса. Структура программного комплекса включает следующие основные элементы:

- Управляющий модуль программного обеспечения, предназначенный для обеспечения интерактивного взаимодействия с пользователем на всех стадиях работы.

- Модуль, предназначенный для создания информационной структуры, в рамках которой будет осуществляться хранение исходных данных, используемых при анализе и результатов проведенного анализа.

- Модуль чтения из базы данных информации о параметрах измеряемых виброакустических процессов, для использования при последующей обработке сигналов.

- Модуль преобразования исходных данных, предназначенный для пакетного дифференцирования/интегрирования исходных сигналов с целью их последующего численного анализа.

- Модуль настройки параметров программного комплекса и формирования эталонных характеристик виброакустических сигналов, предназначенный для их предварительного статистического анализа и выбора численных значений параметров, которые будут использованы при дальнейшем анализе.

- Модуль автоматической обработки вибросигнала, предназначенный для вычисления значений S-дискриминантов, статистических и спектральных характеристик сигнала в широкополосном и наборе узкополосных диапазонов.

- Модуль визуального анализа результатов проведенных численных исследований, используемый для представления результатов анализа в табличном и графическом виде.

- Модуль автоматизированного создания отчетов о результатах, полученных при проведении анализа.

Основная часть модулей программного обеспечения разрабатывалась в среде программирования MATLAB [4]. В частности, компиляция, отладка и сборка программного комплекса проводилась с использованием версии MATLAB R2009a. Использование данной версии связано с реализованной в ней возможностью создания программного обеспечения, которое способно работать на вычислительных системах без непосредственной установки самой среды разработки MATLAB (в режиме stand-alone application). В упомянутой версии MATLAB реализована возможность использования внешних средств компиляции кода. В качестве такого средства при разработке было использовано программное обеспечение Microsoft Visual Studio 2008.

Часть модулей программного комплекса, к которым относятся модуль взаимодействия с базой данных и модуль автоматизированной генерации отчетов, разрабатывалась в среде MS Visual Studio 2008. Код этих модулей был реализован с использованием алгоритмического языка C#. В представляемой версии программного обеспечения для работы с хранилищем результатов виброакустических измерений используется программное обеспечение MS SQL Server. Работа с программным обеспечением Discriminant становится возможной на вычислительном комплексе, работающем под управлением операционной системы MS Windows только после развертывания системных пакетов Microsoft .NET Framework 2.0 - 4.0. Кроме этого на вычислительном комплексе должна быть установлена среда исполнения программного обеспечения Matlab Compiler Runtime.

**4. Некоторые результаты и иллюстрация использования программного обеспечения.** Использование программного обеспечения Discriminant при анализе результатов измерения виброакустического сигнала во многом связано с особенностями метода S-дискриминантов. В частности, этот метод основывается на идеологии фиксации сравнительных изменений: метод ориентирован на обнаружение отклонений характеристик вибросигнала от некоторых эталонных. В качестве эталонного состояния объекта контроля

может быть выбрано, например, состояние оборудования на начальной стадии его эксплуатации.

Выбор множества сигналов, которые будут использоваться при создании эталонных виброхарактеристик, должен осуществляться на основе предварительного анализа этих сигналов. На рис. 1 представлен вид пользовательского интерфейса, предназначенного для решения этой задачи.

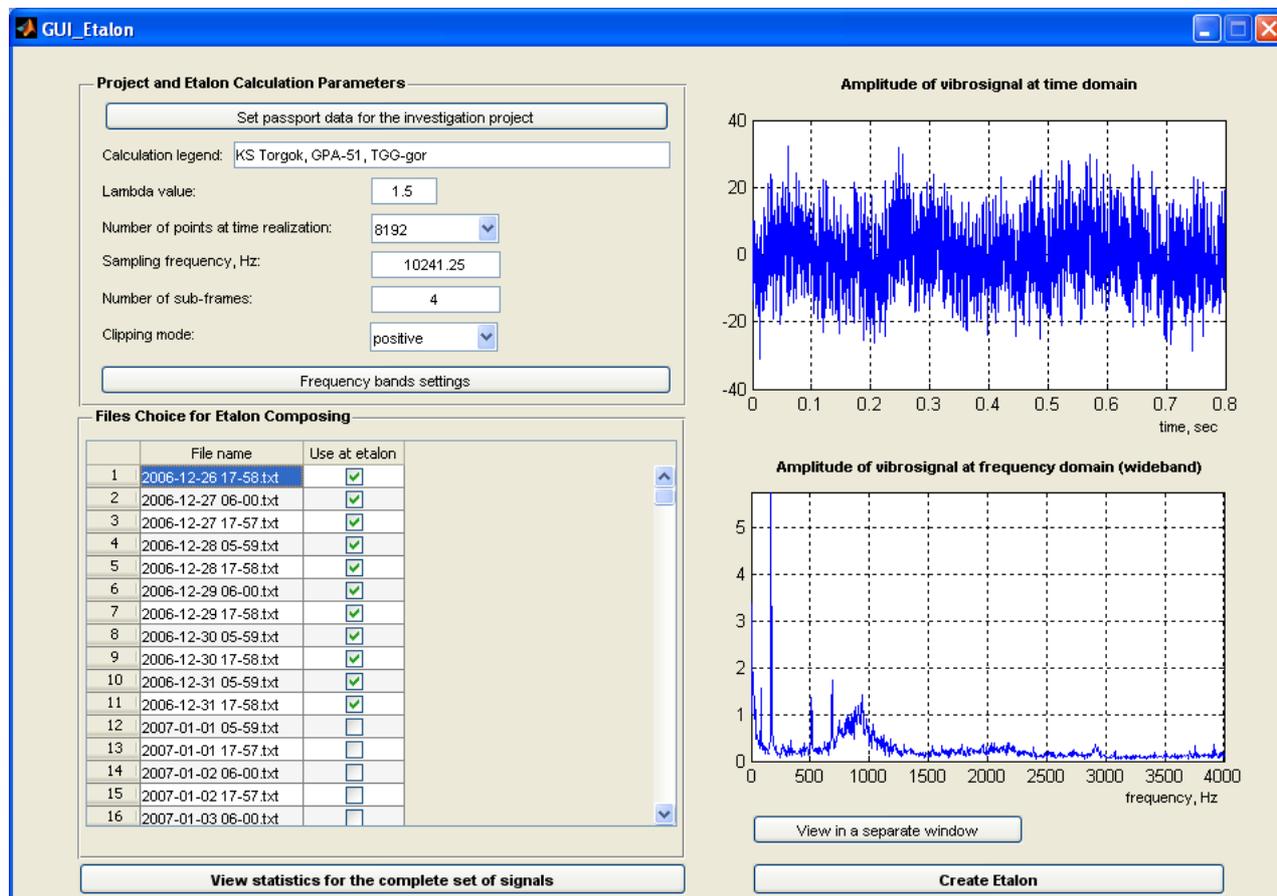


Рис. 1. Интерфейс построения виброакустического эталона и конфигурирования параметров программного обеспечения

Итоговая чувствительность, которую будут проявлять получаемые при анализе величины S-дискриминантов к изменениям в сигнале, во многом определяется успешностью формирования эталонных виброхарактеристик. Поэтому уже на данном этапе диагносту-пользователю программного обеспечения предоставляется общая информация по временной и частотной реализациям вибросигнала, а также по его основным статистическим характеристикам. Необходимо отметить, что в программе предусмотрена возможность проведения исследований по различным видам временной зависимости, к которым относятся виброперемещение, виброскорость и виброускорение.

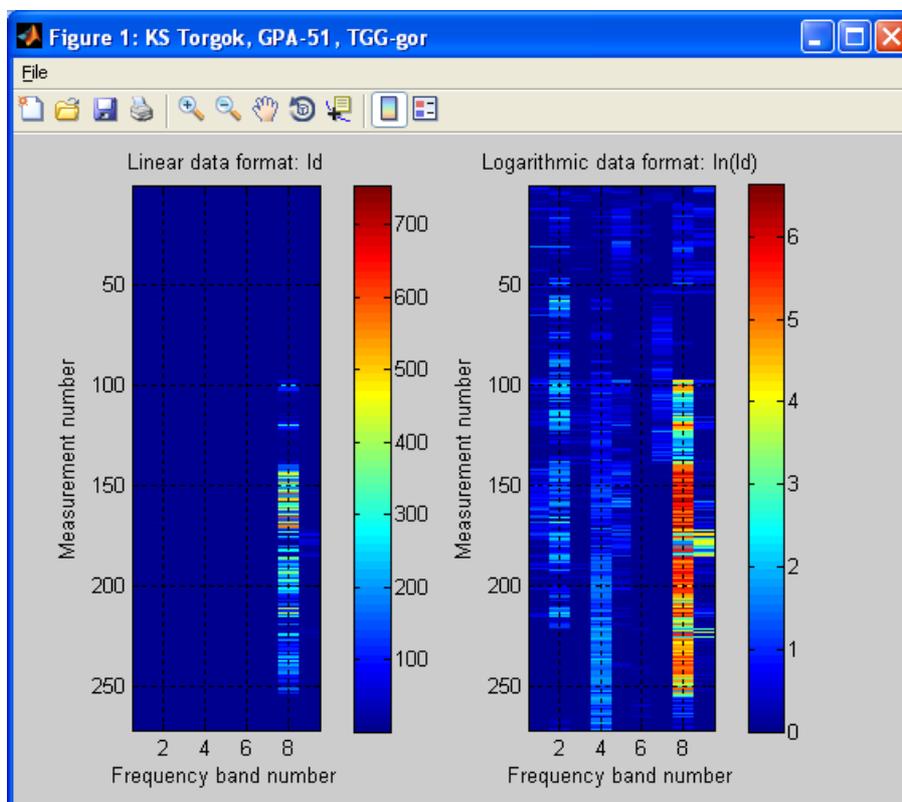
Одной из основных особенностей программного комплекса является реализация широких возможностей пост-обработки результатов проведенных расчетов. При этом интерфейсом программного комплекса не навязывается какой-либо отдельный сценарий проведения визуального анализа. Применение этого подхода позволяет диагносту, использующему программный комплекс, выявлять тенденции в изменении вибросигнала,

формулировать гипотезы, связывающие эти изменения с техническим состоянием оборудования и осуществлять проверку этих гипотез с использованием результатов нескольких альтернативных методов анализа. Это позволяет говорить о том, что программный комплекс позволяет решать не только задачи мониторинга, но и отдельные проблемы диагностирования объекта контроля: резкие изменения величины S-дискриминанта в какой-либо из частотных полос свидетельствуют о возникновении технических проблем при эксплуатации объекта контроля. В таком случае диагност-пользователь может проверить различные гипотезы, призванные объяснить рост величин S-дискриминантов при помощи анализа частотного распределения вибросигнала и зависимости этого распределения от времени эксплуатации.

Этот тезис может быть проиллюстрирован данными, полученными при обследовании следующего объекта: газоперекачивающий агрегат ГПА-51 (двигатель ПС-90ГП2, № 83031077), Компрессорная станция (КС) «Торжокская», ОАО «Газпром». Точка измерения вибросигнала: Тгг-гор. Интервал времени анализа: 26.12.06 - 27.07.07. В ходе контроля было диагностировано развитие дефекта типа прогара соплового аппарата турбины высокого давления (ТВД).

Программный комплекс обладает достаточно разнообразными средствами представления результатов расчета в графическом виде. Получаемые результаты имеют различную степень информативности в отношении изменения технического состояния оборудования. Одним из наиболее ценных в этом смысле является результат вычисления дискриминантов, рассчитываемых по энергии вибросигнала. На

Рис. 2 представлены результаты расчета значений S-дискриминанта в широкой полосе (частотный диапазон с индексом 1) и узкополосных диапазонах. Графическое представление тренда изменения значений дискриминанта в узких полосах частот, которое приведено на данном рисунке в логарифмическом и линейном форматах является одним из наиболее информативных с точки зрения анализа технического состояния оборудования. В частности, видно, что первые отклонения в работе агрегата были замечены в полосе частот до 500 Гц. Прогар соплового аппарата ТВД начал проявляться, начиная с 98-го измерения в полосе частот, имеющей индекс 8 и охватывающей интервал частот: 3.0 – 3.5 кГц.



**Рис. 2.** Зависимость значений дискриминанта в широкой и узких полосах частот в зависимости от номера измерения (на графике представлены результаты для ГПА-51, КС «Торжокская» ОАО Газпром), представленная в линейном и логарифмическом масштабах

К основным задачам мониторинга состояния машинного оборудования относится получение ответов на вопросы: есть ли существенные с точки зрения эксплуатации дефекты, какова степень их развития, насколько быстро происходит деградация состояния оборудования и когда следует прекратить эксплуатацию оборудования. Необходимость получения ответов на эти вопросы заставляет проводить совместный анализ картины изменения значений дискриминантов и характера изменения спектральных характеристик вибросигналов со временем наработки. Программное обеспечение предоставляет такую возможность. Интерфейс, представленный на рис. 3, предназначен именно для решения этой задачи.

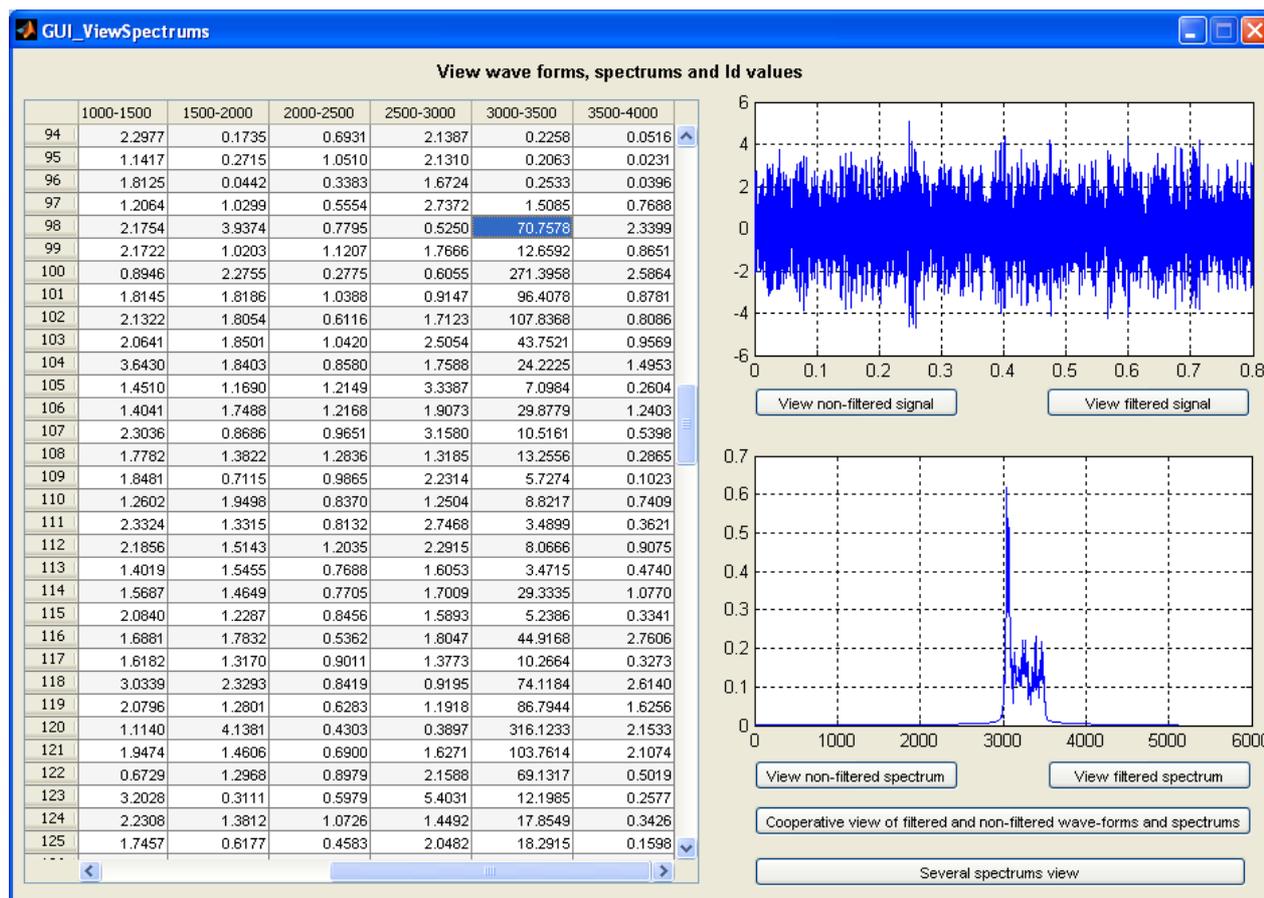
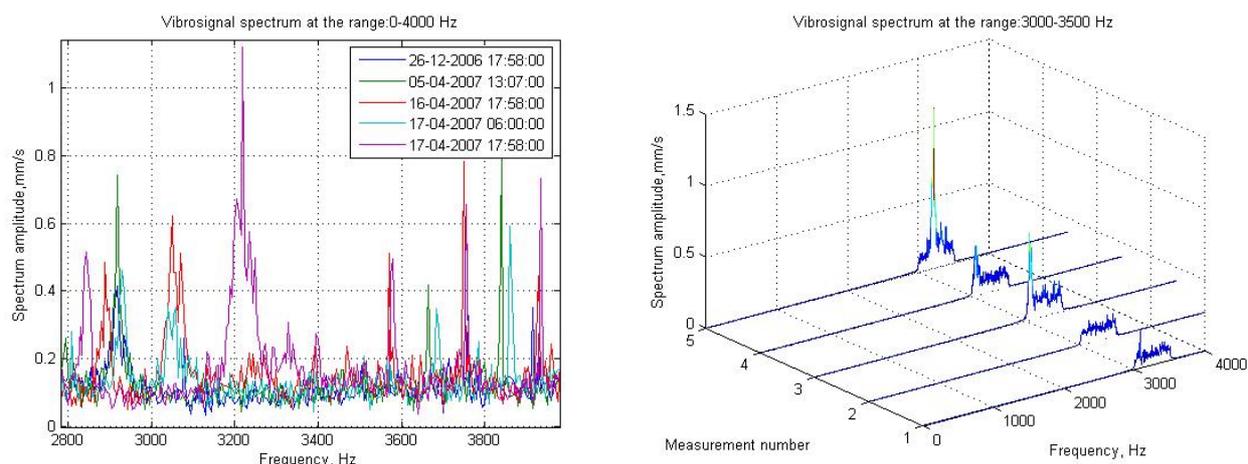


Рис. 3 Вид интерфейса совместного использования результатов спектрального и дискриминантного анализа (представлены результаты для ГПА-51 КС «Горжовская» ОАО Газпром)

В таблице, находящейся в левой части показанного окна, указаны значения S-дискриминанта, вычисленного в соответствующей полосе частот для определенного измерения вибросигнала. Выделение определенного поля этой таблицы приводит к автоматическому отображению временной и частотной реализаций вибросигнала в графических окнах правой части интерфейса. В частности, отображение результатов 98-го измерения амплитуды вибрации в точке ТГГ-гор ГПА-51 показывает, что рост значения дискриминанта обусловлен ростом спектральной амплитуды с частотой, находящейся вблизи 3.0 КГц. При необходимости дополнительного изучения, пользователь может вывести с помощью данного интерфейса узкополосную и широкополосную временную реализацию сигнала, а также спектр сигнала в узкой или широкой полосе частот.

Программное обеспечение дает возможность проанализировать изменение со временем спектральных характеристик вибросигнала или величин S-дискриминантов в заданном частотном диапазоне. На Рис. 4 показаны два альтернативных способа представления графических данных по временной зависимости амплитудного спектра вибросигнала в полосе частот 3.0 – 3.5 кГц. Интерфейс программного комплекса позволяет вывести на один график амплитудные спектры вибросигнала для измерений, которые были проведены на существенно различных этапах эксплуатации оборудования. В частности, на данных графиках использованы результаты обработки широкополосных измерений с номерами 1, 68, 69, 70. Видно, что вблизи 3200 Гц со временем возникает пик, свидетельствующий о прогаре соплового аппарата.



**Рис. 4** Изменение спектрального распределения амплитуды вибросигнала с увеличением времени наработки оборудования (представлены результаты для ГПА-51 КС «Торжокская» ОАО Газпром)

Кроме графического представления результатов расчета программный комплекс Discriminant дает возможность анализа данных в табличном виде. В табличной форме реализуется вывод как основных, так и второстепенных (технологических) статистических характеристик вибросигнала. К этим характеристикам относятся, в частности средняя амплитуда вибросигнала, среднеквадратическое значение (СКЗ), коэффициент эксцесса, пик-фактор, значения дискриминантов, уровень превышения математического ожидания, СКЗ и дисперсии сигнала над пороговым значением и многие другие. Совместный анализ этих характеристик позволяет предварительно определить тип дефекта, оценить степень его развития и определить скорость деградации технического состояния оборудования.

Важной функциональной составляющей программного комплекса с точки зрения его эксплуатации является модуль, реализующий автоматизированную генерацию отчетов о проведенных исследованиях. На завершающей стадии анализа важным является представление его результатов, которое является не только наглядным, но и информативным с точки зрения принимаемого решения о текущем техническом состоянии оборудования. Интерфейс, обеспечивающий решение этой задачи, имеет два компонента, соответственно, для графического и табличного представления результатов вычисления S-дискриминантов.

**5. Заключение.** Методология анализа виброметрических данных, разработанная в Лаборатории виброакустической диагностики машин ИМАШ РАН и реализованная в представляемом программном обеспечении, была успешно использована в ряде задач анализа технического состояния газотурбинных установок (ГТУ) газоперекачивающих агрегатов. В частности, метод анализа использовался для раннего обнаружения неисправностей ГТУ на базе авиационного газотурбинного двигателя ПС-90 на компрессорных станциях (КС) «Смоленская», «Торжокская», «Пуртазовская-1», «Пуртазовская-2», и судового - ДГ-90 на КС ООО «Ямбурггаздобыча» [5, 6]. При использовании метода было обнаружено зарождение следующих типов дефектов:

- Разрушение элементов роликового подшипника турбины высокого давления (ТВД);
- Деградация состояния шарикового подшипника компрессоров низкого и высокого давления (КНД и КВД);
- Развитие повреждений рабочих лопаток КВД и ТВД;
- Развитие повреждений неподвижных элементов ТВД (прогар соплового аппарата 2-ой ступени ТВД)
- Развитие множественных повреждений ГТУ: подвижных и неподвижных элементов ТВД (прогар и эрозия рабочего колеса первой ступени и наружных полок лопаток соплового аппарата второй ступени ТВД).

В ходе проведенных исследований была экспериментально доказана возможность использования метода S-дискриминантов для установления причинно-следственных связей при развитии множественных повреждений, что является особенно важным с точки зрения использования программного обеспечения в задачах диагностики машинного оборудования [5, 6]. Представленное программное обеспечение позволяет выявлять неисправности на стадии их зарождения и проследить динамику развития возникших дефектов.

Представленный вариант применения программного обеспечения Discriminant для анализа состояния газотурбинных двигателей не исчерпывает всех возможных областей его использования. Опыт проведенных исследований показывает, что после соответствующего изменения конфигурационных параметров, программное обеспечение может быть успешно использовано для анализа состояния поршневых двигателей и других механизмов циклического типа.

Направления последующей работы по совершенствованию программного обеспечения Discriminant связаны с планируемым переходом от задач автоматизированного мониторинга к задачам автоматической диагностики. В Лаборатории виброакустической диагностики машин ИМАШ РАН существуют планы применения методов многопараметрического анализа, в частности, методов группового учета аргументов, а также методов автоматического распознавания для анализа технического состояния машинного оборудования.

### Литература

1. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / [под ред. М.Д. Генкина] — М.: Наука, 1984. — 119 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7т. Т. 7: Кн. 2: Балицкий Ф.Я., Барков А.В. и др. Вибродиагностика — М.: Машиностроение, 2005. — 829с.
3. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации — СПб.: Изд-во СПб Государственного морского технического ун-та, 2000. — 169с.
4. MATLAB - The Language of Technical Computing.  
URL: <http://www.mathworks.com> (дата обращения 28.01.2011).
5. 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 (Геленджик, 6-11 сент. 2005 г.). — Москва, 2006. — Т.1, С.94-104.
6. Соколова А.Г. Метод локализации источников повышенной виброреактивности машинного оборудования по данным дискриминантного анализа в задачах вибромониторинга и диагностики неисправностей / Вестник научно-технического развития. Исследования, инновация, внедрения.  
URL: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=384> (дата обращения: 24.12.2010).
7. Серов А.А., Долаберидзе Г.В. и др. Программный комплекс вибромониторинга и диагностики газотурбинных двигателей на основе метода дискриминантного анализа // АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА: Сборник тезисов III Международной научно-технической конференции (Москва, ЦИАМ им. Баранова, 30.11-03.12.2010 г.) — 2010. — С. 1583-1585.
8. Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я. и др. Вибромониторинг и раннее обнаружение эксплуатационных повреждений ГТД методом оценки виброреактивности корпусных конструкций // АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА: Сборник тезисов III Международной

научно-технической конференции (Москва, ЦИАМ им. Баранова, 30.11.2010-03.12.2010 г.) — 2010. — С. 1585-1589.

*Поступила: 02.02.11.*