УДК 621:534

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ПОВЫШЕННОЙ ВИБРОРЕАКТИВНОСТИ МАШИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ДАННЫМ ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИИ В ЗАДАЧАХ ВИБРОМОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

© А.Г.Соколова

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Аннотация. *В статье приводятся результаты применения нового метода вибромониторинга и локализации источников повышенной виброреактивности машинного оборудования для раннего обнаружения и первичной идентификации неисправностей и оперативной оценке скорости их развития. Метод базируется на результатах параллельного узкополосного дискриминантного анализа клиппированных по амплитуде вибрационных сигналов. Приведены примеры практического использования метода для раннего обнаружения эксплуатационных повреждений узлов газотурбинного двигателя компрессорных газоперекачивающих станций.*

Ключевые слова: *машинное оборудование, вибромониторинг, диагностика, виброреактивность, локализация источников, дискриминантный анализ*

1. Введение

Современная технология контроля технического состояния машинного оборудования роторного типа по параметрам вибрации (вибромониторинг) опирается на оценку соответствия среднеквадратического значения (СКЗ) виброскорости на неподвижных элементах конструкции функционирующего оборудования в диапазоне частот 10-1000 Гц (и на первых двух-трех гармониках частоты вращения ротора) нормам «хорошего», «допустимого» и «предельного» состояний [1-3]. При этом стандартные градации предельных уровней вибрации (уставки) сформированы как среднестатистические значения для множества разнотипных машин роторного типа, объединенных в один класс по мощности и массо-габаритным параметрам без учета принципа действия, нагрузки, скоростных режимов функционирования, особенностей возбуждения и характера проявления неисправностей в вибросигналах. Это обстоятельство существенно ограничивает возможности обнаружения эксплуатационных повреждений конкретной машины, особенно на ранней стадии их развития. В работах [4-6] показано, что для обеспечения безаварийной эксплуатации машинного оборудования алгоритмы вибромониторинга, обнаружения эксплуатационных повреждений, локализации источников и диагностики неисправностей должны быть звеньями одной цепи в технологии оценки текущего технического состояния объекта. Решение этих задач должно быть комплексным и опираться на методы обнаружения и диагностики эксплуатационных повреждений на ранней стадии их развития и адекватно отображать реакцию вибрационных процессов на воздействие неисправностей. Использование в технологической цепочке «вибромониторинг технического состояния - диагностика неисправностей машинного оборудования» алгоритма параллельного узкополосного дискриминантного анализа вибросигналов обеспечивает раннее обнаружение эксплуатационных повреждений, локализацию источников повышенной виброреактивности, и идентификацию повреждений. Приведены примеры практического применения нового метода локализации источников повышенной виброреактивности машинного оборудования

для раннего обнаружения и первичной идентификации неисправностей газотурбинных двигателей (ГТД) газоперекачивающих агрегатов (ГПА) компрессорных станций (КС).

2. Методы локализации источников повышенной виброреактивности

2.1. Спектральные методы локализации источников

Известно, что зарождение и развитие деградационных процессов в узлах роторных механизмов типа подшипников качения и скольжения, зубчатых механизмов, лопаточного аппарата компрессоров и турбин и др, обусловленных развитием усталостного износа в узлах трения, эрозией, коррозией, трещинообразованием и т.п., сопровождается, как правило, генерацией последовательности импульсных вибросигналов малой амплитуды. При выборе перечня параметров вибросигнала, по которым можно оценивать текущее техническое состояние объекта и характер неисправности, очень важно, чтобы параметры могли быть достаточно легко измеряемы, чувствительны к диагностируемым дефектам и непрерывно возростали при ухудшении технического состояния узла.

При этом следует иметь ввиду, что выделение полезной информации о текущем техническом состоянии узла в процессе его деградации должно происходить в условиях недоступности для непосредственного измерения колебаний, в условиях перекрестного взаимодействия вращающихся элементов конструкции машины, маскировки полезного сигнала шумами от других работающих узлов, возбуждения множества полигармонических процессов, также маскирующих полезный сигнал.

Одним из путей раннего обнаружения и локализации эксплуатационных повреждений сложного машинного оборудования в этих условиях является паспортизация спектров вибросигналов на этапе нормального функционировании машины и последующее сравнение измеряемых в процессе эксплуатации спектров с паспортными данными, т.е. оценка приращения уровней спектральных компонент с наработкой, поиск частотных диапазонов максимальных приращений и их идентификация. Существует несколько модификаций спектральных методов обработки сигналов, в том числе спектральный анализ с постоянной абсолютной частотной полосой (Δf=Const), с постоянной относительной в процентном отношении полосой ($\Delta f / f_o$= Const), узкополосный анализ с высоким разрешеием на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ), метод спектрального анализа в зоне высокочастотного резонанса. Проблема состоит в том, что данные процедуры мало эффективны из-за малости приращений спектральных амплитуд при зарождении дефекта по сравнению абсолютными значениями спектральных компонентов.

2.2. Локализации источников повышенной виброреактивности методом анализа спектр-куртосиса

Более чувствительным к выбросам амплитуды вибросигнала, чем спектр амплитуд является спектр-куртосис (***SK***), - параметр, достаточно широко используемый для локализации источников нестационарного вибровозбуждения в машине [7-9] при развитии деградационных процессов, сопровождающихся возникновением ударных импульсов при попадании локальных дефектов контактирующих поверхностей в зону контакта. Данный параметр сформирован из статистических характеристик высокого порядка от спектрального преобразования ***H(t, f)*** короткой реализации временного процесса ***x(t)*** “short time Fourier transformation” – (***STFT***) и используется для анализа переходных процессов в частотной области на резонансных частотах механической системы. Спектр-куртосис может быть рассчитан как отношение спектральной амплитуды на частоте f в четвертой степени в момент времени t, усредненной на коротком временном интервале ΔT, к квадрату средней мощности на том же временном интервале, определяемом временем затухания импульса:

$$SK(f) = \frac{\left\langle |H(t,f)|^4 \right\rangle}{\left\langle |H(t,f)|^2 \right\rangle^2} - 2 \qquad (1)$$

Как показано в работе [8], ***SK***=0 для сигналов с нормальным законом распределения амплитуд и гармонических сигналов и отличен от нуля для переходных процессов в полосах частот проявления дефекта. Обычно без предварительной обработки сигнала, улучшающей отношение сигнал/помеха, локализация частотного диапазона с максимальным значением ***SK*** для подконтрольной реализации сигнала производится в полосах частот ***Δf***, сужающихся квантами (***Δf/f₀***= 1 октава, 1/2-окт., 1/3-окт., …, до 1/21-окт., 1/24-окт.). На рис.1 изображена картинка [8] спектр-куртосиса при локализации дефекта подшипника качения. При этом частотный диапазон проявления дефекта и оптимальная полоса анализа оцениваются по интенсивности окрашивания поля в соответствии с бар-графом. Анализ значений спектр-куртосиса в различных полосах частот производится для выявления зоны резонанса с наиболее выраженным проявлением дефекта для последующего анализа в данной полосе частот спектра амплитудной огибающей и выявления частот, генерируемых поврежденным узлом.

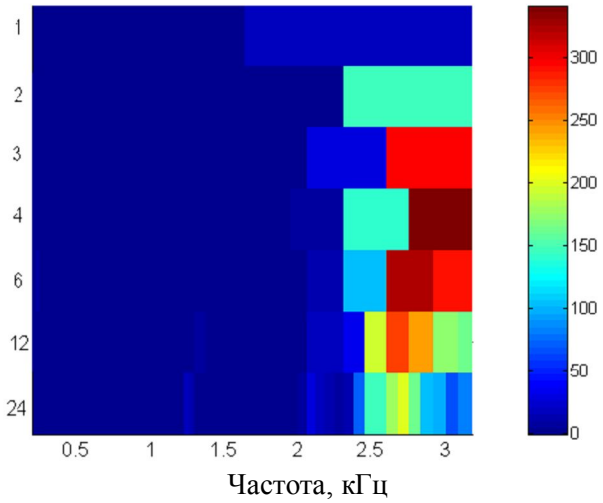


Рис.1. *Изображение спектр-куртосиса **SK** вибрации изношенного подшипника качения (с дефектами внутреннего и наружного колец) в координатах: по оси **X** - частота в кГц, по оси **Y** – 7 наборов фильтров (с относительной шириной полос: **Δf/f₀** =1октава,1/2, 1/3, 1/4, 1/6,1/12, 1/24 октавы).*

3. Методы локализации источников повышенной виброреактивности объекта по максимальным значениям дискриминантов в узких полосах частот

Практика показала, что чем сложнее машина, тем больше разброс измеряемых вибрационных параметров в пределах генеральной совокупности машин. Поэтому так актуален индивидуальный подход при организации процедуры вибромониторинга.

Для реализации процедуры вибромониторинга критических машин и раннего обнаружения отклонений параметров технического состояния от номинальных предложен алгоритм на основе комплексной оценки изменений безразмерных S-дискриминантов клиппированных по амплитуде сигналов виброускорения в полосах проявления дефектов узлов, лимитирующих ресурс оборудования. Ниже приведена формула дискриминанта (индекса превышения сигналом порога клиппирования ***P*** по дисперсии выбросов),

использующаяся в материале данной публикации [4]:

$$I_d = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[(x_i)_{(t)} - P\right]^2}{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[(x_j)_{(0)} - P\right]^2} \cdot \left(\frac{K_{(t)}}{K_{(0)}}\right)$$

В отличие от стандартных методов вибромониторига машин роторного типа, функционирующих по принципу установления факта превышения пороговых значений (заводских уставок) вибрационных параметров, ориентированных на использование средеквадратических значений (СКЗ) вибрационных процессов в различных полосах частот (как правило, общего уровня вибрации в полосе измерения, уровня виброскорости в полосе частот 10-1000 Гц, амплитуд виброскорости первых трех гармоник частоты вращения ротора) алгоритмы вибромониторинга машинного оборудования с адаптацией к эталонному состоянию на основе дискриминантного анализа вибросигналов [4-6] обладают большей монотонностью и гораздо более высокой чувствительностью к изменчивости вибросигналов при ухудшении технического состояния машин (при значениях дискриминанта Id>>1).

Высокая чувствительность S-дискриминантов к выбросам амплитуды при ухудшении технического состояния машины и росту амплитудных значений вибрации на характерных частотах явилась основанием для их использования в алгоритмах локализации источников повышенной виброреактивноти. В методе локализации источников повышенной виброреактивности оценивается рост относительных (безразмерных значений) S-дискриминантов вибрации (виброперемещения, виброскорости или виброускорения) в любых, заданных оператором, полосах частот во всем диапазоне частот используемой виброизмерительной аппаратуры.

Метод локализации источников повышенной реактивности вибрации, т.е. частотных диапазонов максимальной изменчивости вибросигнала по сравнению с эталонным вследствие зарождения и развития эксплуатационных повреждений узлов машины, базируется на результатах параллельного дискриминантного анализа вибраций в различных полосах частот. Ниже представлены 2 способа локализации источников повышенной виброреактивности, адаптированных к измеряемым в промышленных условиях газоперекачивающих станций вибрационных процессов (виброскорости в диапазоне частот 0-4.0 кГц) на корпусе газотурбинной установки (ГТУ). Приведены примеры практического использования метода для раннего обнаружения эксплуатационных повреждений узлов авиационного двигателя ПС-90 компрессорных газоперекачивающих станций по данным измерения корпусной вибрации и ее обработки с помощью программного комплекса «Виброэксплорер» [10].

3.1. Локализация источников виброреактивности объекта по максимальным значениям дискриминантов в полосах частот, сужающихся в соотношении 1:2.

Данный способ состоит в выявлении частотных диапазонов максимального увеличения виброреактивности по сравнению с эталонной (Id≈1), характерной для нормального технического состояния, на основании результатов параллельного дискриминантного анализа вибрации точки корпуса объекта в различных полосах частот, сужающихся в соотношении 1:2, и представление информации, полученной на некотором временном интервале эксплуатации объекта, в табличной форме. Помимо цифровых данных информация о виброреактивности представляется в цветном изображении значений дискриминанта в соответствии с бар-графом, в котором цвета меняются от зеленого к желто-красным тонам, затем коричневым, фиолетово-синим и, наконец, черному цвету. Градации цветовой гаммы бар-графа соответствуют интервалам амплитудных значений

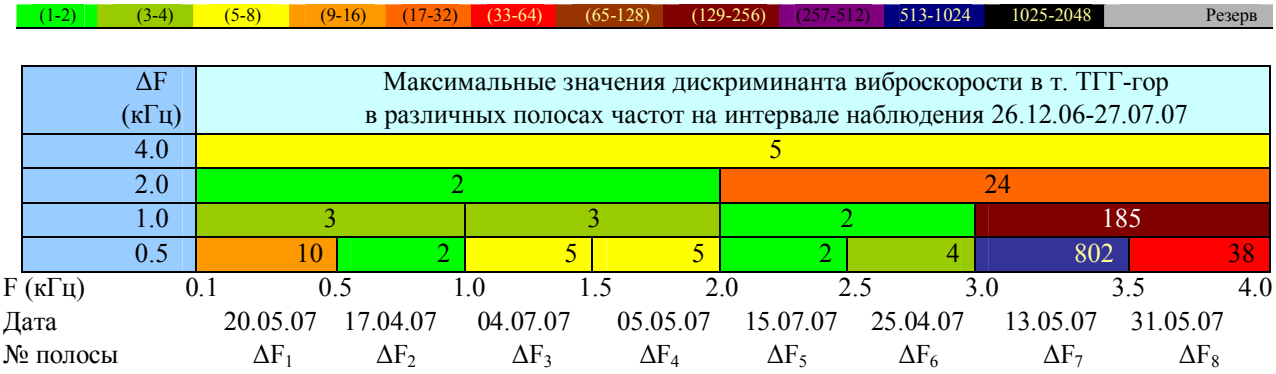
дискриминанта в логарифмическом масштабе по основанию 2: ярко-зеленый соответствует значениям дискриминанта в пределах (1-2), желто-зеленый (3-4), желтый (5-8), песочный (9-16), оранжевый (17-32), красный (33-64), светло-коричневый (65-128), темно-коричневый (129-256), фиолетовый (257-512), синий (513-1024), черный (1025-2048 и выше).

В отличие от известного метода локализации источников путем оценки значений спектр-куртосиса (**SK**) вибрации в сужающихся относительных (в процентном отношении) полосах частот в фиксировнный момент времени [8], метод локализации источников повышенной виброреактивности по трендовым характеристикам S-дискриминантов узкополосных клиппированных вибросигналов обладает супервысокой чувствительностью к изменчивости вибрационных сигналов под воздействием деградационных процессов не в фиксированный момент времени, а на всем интервале мониторинга технического состояния машинного оборудования.

Ниже представлены таблицы локализации источников виброреактивности газотурбинной установки ГТУ-16 по максимальным значениям трендовых характеристик дискриминанта в полосах частот 4.0; 2.0; 1.0; 0.5 кГц для трех типов эксплуатационных повреждений двигателя ПС-90: прогара соплового аппарата 2-ой ступени турбины высокого давления (ТВД), прогара рабочих лопаток ТВД, разрушении роликового подшипника ТВД двигателя ПС-90. Во всех трех случаях измерения вибраций производились в зоне турбогенератора (ТГГ) в горизонтальном направлении в точке ТГГ-гор на корпусе двигателя.

Таблица 1

Локализация источников повышенной виброреактивности корпуса двигателя по максимальным значениям S-дискриминантов в полосах частот, сужающихся в соотношении 1:2, ***при прогаре соплового аппарата 2-ой ступени ТВД*** *двигателя ПС-90*



Даже при беглом взгляде на цветную картинку табл.1, становится очевидно, что прогар соплового аппарата ТВД существенно изменяет параметры вибросигнала в высокочастотой области: от 3.0 до 4.0 кГц с максимальным значением дискриминанта Max Id=185. Данные измерений широкополосной (0-4.0 кГц) и низкочастотной (0.1-0.5 кГц) вибрации Однако наиболее виброреактивен диапазон частот 3.0-3.5 кГц, в котором Max Id=802.2. На рис.2 приведено изображение тренда дискриминанта Id в полосе частот 3.0-3.5 кГц, из которого следует, что максимальное значение дискриминанта имело место 13.05.07, а двигатель был снят с эксплуатации по прогару соплового аппарата только 27.07.07.

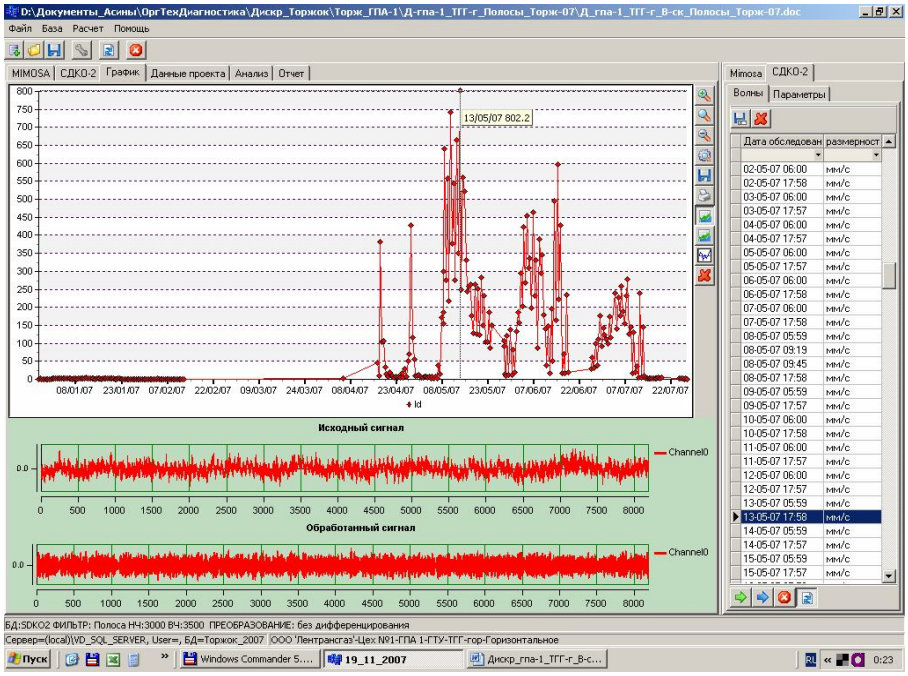


***Рис.2**.Тренд дискриминанта виброскорости ГТД ПС-90 в точке корпуса ТТГ-гор в полосе частот 3.0-3.5 кГц при прогаре соплового аппарата ТВД. (Max Id=802.2 от 13.05.07. Интервал эксплуатации до останова двигателя на ремонт: 26.12.06-27.07.07)*

Информация, представленная в табл.1, заставляет целенаправленно изучать спектры вибрации в диапазонах частот максимальной виброреактивности для идентификации вида повреждения. В качестве примера на рис. 3, где изображены временные реализации и спектры широкополосного (0-4.0 кГц) и узкополосного (3.0-3.5 кГц) сигналов виброскорости от 13.05.07, когда дискриминант в узкой полосе частот достигал значения ≈ 802, можно увидеть спектральную составляющую с частотой f_o ≈ 3,3 кГц, параметры которой изменяются от измерения независимо от частоты вращения вала газогенератора.

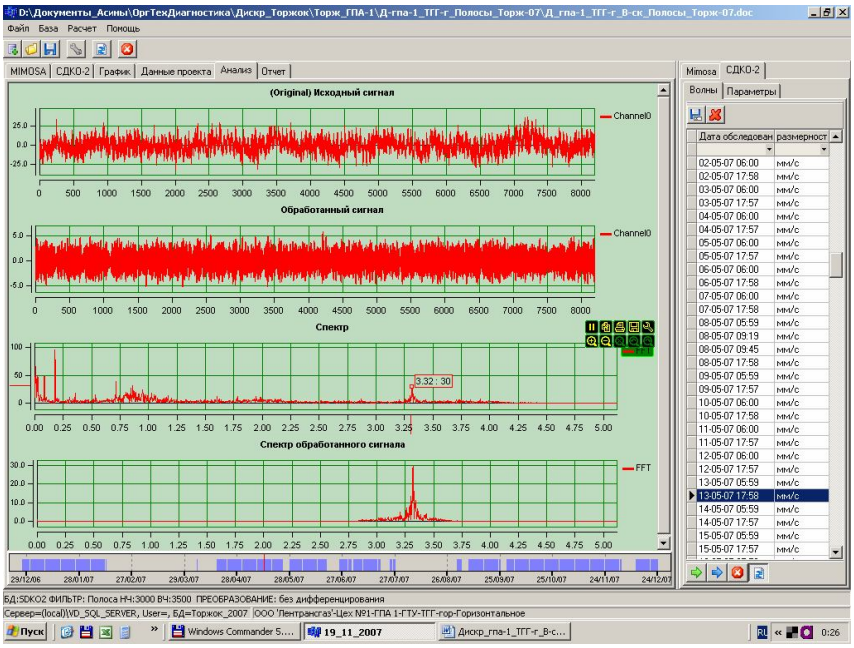


***Рис.3**. Временные реализации и спектры виброскорости в т. ТТГ-гор в полосах частот:*

3,0-3.5 кГц (внизу) и 0-4.0кГц (второй снизу) от 13.05.07 (Max Id=802.2) при прогаре соплового аппарата 2-ой ст. ТВД двигателя ПС-90.

Можно предположить, что физическим источником возбуждения звуковых колебаний на данной частоте является свист, - автоколебательный процесс, возникающий при вихреобразовании газа на краях сквозного отверстия в конструкции соплового аппарата при истечении газа под большим давлением, форма спектра при этом близка к резонансной. Развитие дефекта со временем наработки сопровождалось не только снижением амплитуды колебаний, но и снижением частоты вибрации с максимальным значением амплитуды в полосе: от 3.32 кГц (13.05.07) до 3.14 кГц (27.07.07).

Таблица 2

Локализация источников повышенной виброреактивности корпуса двигателя по максимальным значениям S-дискриминантов в полосах частот, сужающихся в соотношении 1:2, ***при прогаре рабочих лопаток ТВД*** *двигателя ПС-90*

(1-2) (3-4) (5-8) (9-16) (17-32) (33-64) (65-128) (129-256) (257-512) 513-1024 1025-2048

ΔF (кГц)	Максимальные значения дискриминанта виброскорости в т. ТГГ-гор в различных полосах частот на интервале наблюдения 26.12.06-29.10.07 при развитии прогара рабочих лопаток ТВД							
4.0	17							
2.0	4				10			
1.0	6		2		7		95	
0.5	57	2	2	3	2	66	185	134
F (кГц)	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Дата	27.04.07	09.06.07	02.06.07	10.06.07	22.05.07	08.06.07	1.06.07	17.06.07	
№ полосы	ΔF_1	ΔF_2	ΔF_3	ΔF_4	ΔF_5	ΔF_6	ΔF_7	ΔF_8	

Анализ данных, приведенных в табл.2, позволяет сделать заключение о том, что при прогаре рабочих лопаток турбогенератора возбуждаются сложные колебательные процессы, захватывающие диапазон частот от 2.5 до 4.0 кГц с максимальной виброреактианостью в полосе 3.0-3.5 кГц (max Id=185 от 11.06.07). При этом нельзя не отметить тот факт, что в полосе оборотных частот 0.1-0.5 кГц максимальный всплеск виброреактивности наблюдался еще 27.04.06 (max Id=56.7), т.е. за 1.5 месяца до прогара лопаток турбины. График тренда дискриминанта в полосе частот 3.0-3.5 кГц при развитии повреждения вращающихся элементов газогенератора (ГГ) изображен на рис.4.

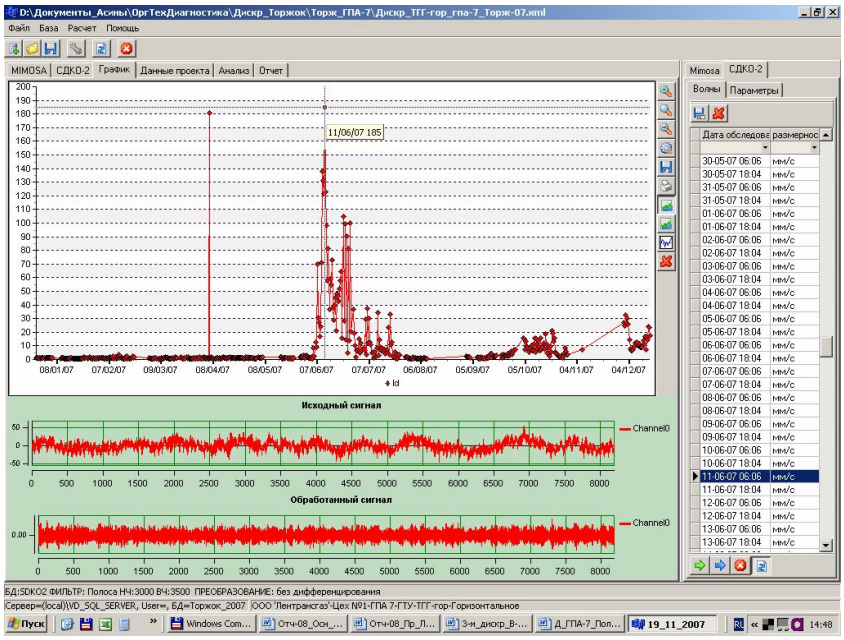


Рис.4. *Дискриминант виброскорости в т. ТГГ-гор ГПА-7, КС «Торжокская» в полосе 3.0-3.5 кГц при прогаре рабочих лопаток ТВД. (Max Id=185 от 11.06.07_06.06; Id=180.5 от 05.04.07_13.14. Интервал эксплуатации до останова двигателя: 26.12.06-29.10.07).*

На рис.5 представлены временные реализации и спектры широкополосного и узкополосного (3.0-3.5 кГц) сигналов виброскорости от 11.06.07 при значении дискриминанта Id=185.

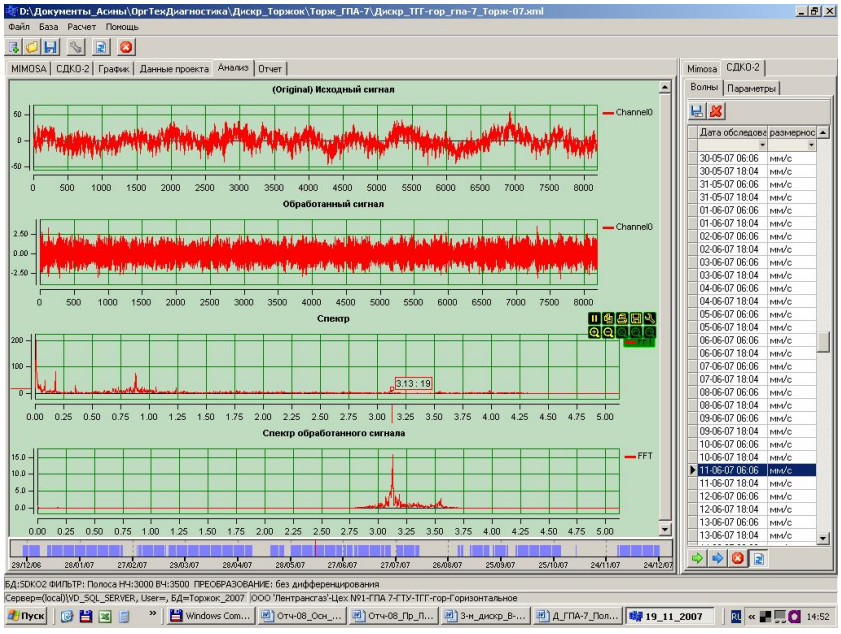


Рис.5. *Временные реализации и спектры виброскорости в т. ТГГ-гор в полосах частот: 0-4.0 кГц и 3,0-3.5 кГц при прогаре рабочих лопаток ТВД. (Max Id=185 от 11.06.07).*

Таблица 3

Локализация источников повышенной виброреактивности корпуса двигателя по максимальным значениям S-дискриминанта в полосах частот, сужающихся в соотношении 1:2, ***при разрушении элементов роликового подшипника ТВД*** *двигателя ПС-90*

(1-2) (3-4) (5-8) (9-16) (17-32) (33-64) (65-128) (129-256) (257-512) 513-1024 1025-2048

ΔF (кГц)	Максимальные значения дискриминанта виброскорости в т. ТГГ-гор, в полосах частот на интервале наблюдения 26.12.06-13.05.07 при развитии повреждений роликового подшипника ТВД
4.0	6
2.0	2 | 6
1.0	2 | 2 | 3 | 13
0.5	16 | 2 | 2 | 3 | 3 | 7 | 32 | 3

F (кГц)	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Дата		18.04.07	07.01.07	29.04.07	03.04.07	05.04.07	10.01.07	17.04.07	18.04.07
№ полосы		ΔF_1	ΔF_2	ΔF_3	ΔF_4	ΔF_5	ΔF_6	ΔF_7	ΔF_8

Дискриминантный анализ вибрации с варьируемой шириной полосы ΔF: 4.0; 2.0; 1.0; 0.5 кГц позволил выделить полосы вибросигнала с наибольшим изменением амплитуды дискриминанта на интервале наблюдения от нормального состояния ГТУ до состояния, связанного с развитием неисправности до предельно допустимых значений. Оказалось, что трендовые характеристики дискриминанта в полосах частот 3.0-3.5 кГц и 0.1-0.5 кГц приобретают максимальные значения примерно в одно и то же время: 17.04.07 и 18.04.07 с запаздыванием на 1сутки, но наибольшей чувствительностью к повреждению обладает дискриминант в полосе частот 3.0-3.5 кГц (рис.5), изменение которого с деградацией роликового подшипника характерно для процесса изнашивания контактирующих поверхностей элементов подшипника качения [11]. Падение значений дискриминанта после 10.04.07 до уровня <1 означает необратимое изменение технического состояния двигателя, требующее идентификации неисправности [4].

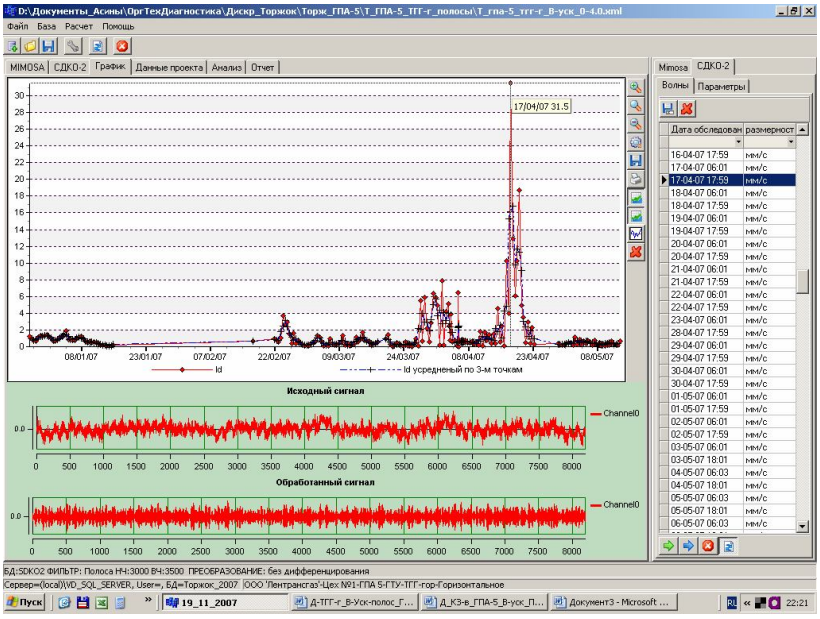


Рис.5*. График дискриминанта Id (P=1.5бп) виброскорости в т.* ***ТГГ-гор*** *в полосе 3.0-3.5 кГц на интервале наблюдения 26.12.06-13.05.07. Эталон:26-29.12.06. Max Id=31.5 от 17.04.07.*

Спектр виброскорости в момент времени 17.04.07_17.59., соответствующий максимальному значению дискриминанта (Max Id=31.5) в полосе частот 3.0-3.5 кГц, представлен на рис.6.

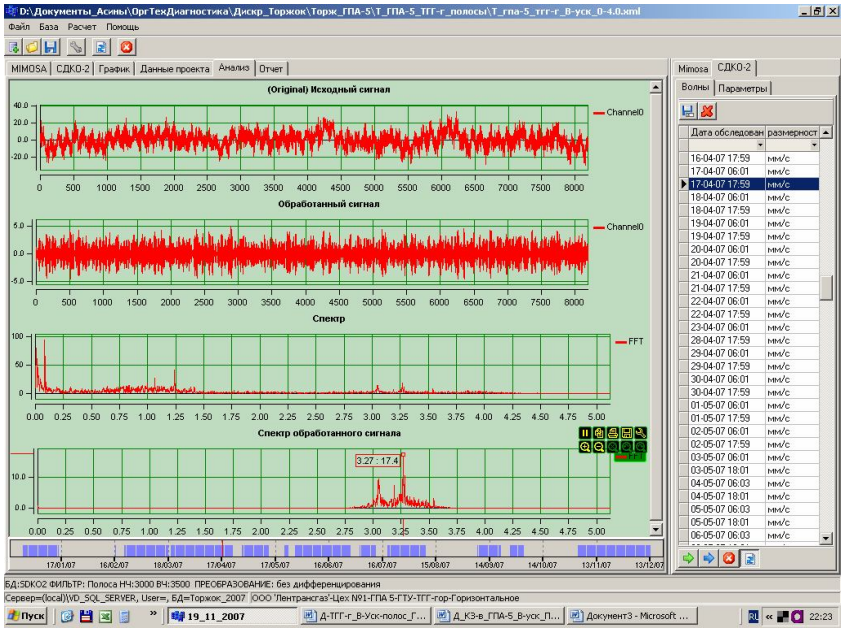


Рис.6. *Временные реализации и спектры виброскорости в т. ТГГ-гор в полосе частот 3.0-3.5 кГц от 17.04.07. (Max Id=31.5)*

Результаты дискриминантного и спектрального видов анализа вибрации в т.ТГГ-гор корпуса двигателя ПС-90 показали, что максимальные отклонения амплитуд спектральных компонентов вибрации от нормы наблюдались 17.04.07 в диапазоне частот от 2.5 до 3.5 кГц, что соответствуют проявлению локального повреждения внутреннего кольца роликового подшипника ТВД, вследствие чего в спектре появились комбинационные частоты, характерные для данного дефекта. При этом в зоне оборотных частот с некоторым запаздыванием (18.04.07) наблюдался рост виброреактивности на частоте вращения ротора ГГ (проявление дисбаланса ротора) как следствие повреждения элементов роликового подшипника.

Практика показала, что результаты дискриминантного анализа вибрации данного двигателя (дефект внутреннего кольца роликового подшипника ТВД) находятся в соответствии с результатами оценки технического состояния двигателя по другим показателям (наличия стружки в масле, результатах визуального осмотра и т.п.). В действительности двигатель был остановлен для ремонта 13.05.07 в связи с наличием стружки в масле на сливе подшипника ТВД ГГ из-за повреждений роликового подшипника ТВД, т.е. почти через месяц после обнаружения и идентификации данного дефекта виброакустическим методом.

Примеры, приведенные выше, позволяют сделать вывод, что метод локализации виброреактивности по максимальным значениям трендовых характеристик дискриминантов вибрации в полосах частот, сужающихся в соотношении 1:2, позволяет на интервале эксплуатации машины от нормы до появления неисправности выявить частотный(е) диапазон(ы) максимального увеличения уровня вибрации или появления выбросов амплитуды большой интенсивности по сравнению с эталонными, характерными для нормального технического состояния. Последующий спектральный анализ вибрации в диапазонах максимальной виброреактивности позволяет заблаговременно (до аварийного

останова) идентифицировать вид повреждения. При этом для идентификации дефектов необходимо принимать во внимание не только частотные диапазоны изменения вибрационного состояния и значения дискриминантов, но и временную последовательность появления максимальных значений виброреактивности в разных частотных диапазонах. Это позволяет установить причинно-следственную связь развития взаимосвязанных неисправностей.

3.2. Метод вибромониторинга и локализации источников повышенной виброреактивности путем параллельного сканирования значений дискриминантов в узких полосах частот

Второй способ представления информации в методе локализации источника повышенной реактивности вибрации состоит в трехмерном цветном представлении тренда значений дискриминантов широкополосной и узкополосной вибрации в табличной форме в координатах: частота, время, амплитуда. Для локализации диапазонов частот максимальной виброреактивности и установления причинно-следственных связей изменения виброактивности двигателя со временем наработки ГТУ в каждой измерительной точке целесообразно производить параллельный вибромониторинг в фиксированных узких полосах частот. Таблицы виброреактивности позволяют в текущий момент времени визуально оценить ситуацию, связанную с отклонением технического состояния ГТУ от нормы, для оперативного принятия решения по дальнейшей эксплуатации объекта.

Ниже (в усеченном виде) приведены примеры 3-х мерного (в табличной форме в координатах: частота, время, амплитуда) представления тренда значений дискриминантов широкополосной (0-4.0 кГц) и узкополосной вибрации в 8 полосах частот шириной ΔF≈500 Гц при развитии упомянутых выше в разделе 3.1 повреждений узлов авиационного двигателя ПС-90 (Таблицы 1-3).

Таблица 4

Локализация источников повышенной виброреактивности по тренду значений дискриминантов виброскорости корпуса ГТУ при развитии дефекта типа ***прогара соплового аппарата 2-й ст. ТВД*** *на интервале эксплуатации 26.12.06-27.07.07. (Выборочные данные).*

(1-2)	(3-4)	(5-8)	(9-16)	(17-32)	(33-64)	(65-128)	(129-256)	(257-512)	513-1024	1025-2048	Резерв

	ΔF ≈ 4.0 кГц	ΔF ≈0.5 кГц							
ΔF, кГц	0-4.0	0.1-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0
26.12.06_18.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12.02.07_06.00	0	1	0	1	0	0	1	0	0
Резерв (13.02-15.04.07)									
16.04.07_18.00	2	2	1	2	3	1	1	45	2
17.04.07_06.00	2	3	2	2	1	1	2	9	3
17.04.07_18.02	1	4	2	1	1	1	1	382	2
18.04.07_18.00	1	2	1	2	2	1	2	106	1
20.04.07_06.00	1	2	1	1	1	1	3	6	1
26.04.07_18.00	2	3	1	3	2	1	1	51	2
27.04.07_18.00	1	2	1	2	4	1	2	428	2
28.04.07_06.00	1	3	1	2	1	1	1	116	2
28.04.07_18.00	1	2	2	1	1	1	3	54	0
06.05.07_06.00	1	0	0	3	3	1	2	2	0
06.05.07_18.00	2	4	1	2	1	0	2	40	2
07.05.07_06.00	1	1	1	2	2	1	1	15	0

08.05.07_06.00	2	3	1	2	2	1	2	185	1
08.05.07_09.45	3	5	1	2	2	1	1	300	1
10.05.07_06.00	1	2	1	2	1	1	1	742	0
11.05.07_06.00	2	2	1	2	2	2	0	376	0
12.05.07_18.00	2	2	1	2	2	1	0	663	1
13.05.07_06.00	1	2	1	3	1	1	0	350	1
13.05.07_18.00	2	3	1	2	2	1	0	802	1
14.05.07_06.00	2	3	1	3	1	1	0	249	1
14.05.07_18.00	2	4	1	2	4	1	0	560	1
15.05.07_18.00	2	3	1	2	5	0	0	330	23
17.05.07_06.00	3	3	1	2	1	1	0	263	1
17.05.07_18.00	4	4	1	3	1	1	0	176	12
18.05.07_06.00	2	1	1	2	0	1	0	126	1
19.05.07_18.00	3	7	1	1	2	1	0	250	11
20.05.07_18.00	1	10	1	2	2	1	0	282	5
21.05.07_18.00	2	3	0	1	2	0	0	232	10
23.05.07_18.00	3	5	0	1	3	1	0	87	23
24.05.07_06.00	1	2	1	1	1	1	0	150	2
Резерв с 25.05 по 27. 05.07									
28.05.07_08.32	1	5	0	2	2	1	1	107	17
28.05.07_18.02	1	1	0	1	2	1	0	10	31
29.05.07_06.00	1	2	0	3	3	0	0	122	33
29.05.07_18.00	0	1	1	1	3	0		12	17
30.05.07_06.00	1	1	0	2	1	1	0	137	11
30.05.07_18.00	1	2	1	1	2	0	0	11	17
31.05.07_06.00	1	2	1	2	1	1	0	82	13
31.05.07_18.00	2	4	1	2	3	0	0	20	39
02.06.07_18.00	2	2	1	3	1	1	0	195	0
06.06.07_18.00	1	1	1	3	0	1	0	465	1
10.06.07_18.00	1	1	0	3	2	1	0	140	1
12.06.07_06.00	1	1	1	3	0		0	16	2
12.06.07_18.00	1	1	1	2	1	1	0	195	1
14.06.07_18.00	1	3	1	2	1	1	0	598	3
16.06.07_18.00	1	0	0	2	1	1	0	69	1
17.06.07_06.00	1	1	1	2	1	1	0	16	1
18.06.07_06.00	1	1	1	3	1	1	0	190	1
Резерв с 19.06 по 24.06..07									
25.06.07_18.00	1	1	0	4	0	2	0	29	9
26.06.07_18.00	1	0	0	3	1	2	0	60	15
27.06.07_18.00	1	0	0	4	1	2	0	11	11
28.06.07_18.00	1	0	0	3	0	1	0	175	2
07.07.07_18.00	0	0	0	3	0	1	0	278	1
09.07.07_18.00	1	0	0	3	0	2	0	131	1
11.07.07_06.00	0	0	0	2	0	1	0	6	1
11.07.07_18.00	0	0	0	2	0	1	1	240	1
12.07.07_06.00	0	0	0	3	0	2	0	5	1
12.07.07_18.00	0	0	0	3	1	1	0	145	1
18.07.07_18.00	0	0	0	1	1	1	0	4	1
Резерв с 19.07 по 23.07..07									
24.07.07_18.00	1	1	0	0	1	1	0	1	1
27.07.07_18.00	0	0	0	1	1	1	0	1	1

Из выборочных данных, приведенных в табл.4, следует, что при развитии дефекта типа прогара соплового аппарата ТВД существенные изменения дискриминанта наблюдаются, в основном, в диапазоне частот 3.0-3.5 кГц. Первые существенные отклонения дискриминанта от нормы (Id=45 при пороге клиппирования $P=1.5\sigma_n$) появились 16.04.07 сразу же при запуске двигателя после длительного пребывания его в резерве (с 13.02 по 15.04.07). Уже на следующий день работы выбросы значений дискриминанта достигли величины Id=382. При дальнейшей работе двигателя наблюдались существенные флуктуации дискриминанта (±150÷300), достигшие максимального значения (Id=802) 13.05.07. С 15.05.07 появились довольно значительные изменения дискриминанта (до 30-40) в диапазоне частот 3.5-4.0 кГц. По данным дискриминантного анализа можно сделать заключение, что к середине мая деградационный процесс достиг своего апогея и было бы целесообразно произвести останов двигателя для освидетельствования его состояния, а при необходимости и проведения ремонтных работ. Однако реально двигатель находился в эксплуатации почти до конца июля (по 27.07.07), что не способствовало поддержанию его в работоспособном состоянии.

Следует отметить следующую характерную закономерность проявления в вибросигнале повреждения неподвижного элемента двигателя - практическое отсутствие отклонений дискриминантов от нормы (Id<3÷5) в широкой полосе частот (0-4.0 кГц) и в низкочастотном (0.1-0.5 кГц) диапазоне частот, содержащем гармоники частот вращения двух роторов ГТУ (Id≤10).

Таблица 5

Локализация источников повышенной виброреактивности по тренду значений дискриминантов виброскорости корпуса ГТУ ***при развитии дефекта типа прогара рабочих лопаток ТГГ*** *на интервале эксплуатации 26.12.06-29.10.07. (Выборочные данные).*

(1-2) (3-4) (5-8) (9-16) (17-32) (33-64) (65-128) (129-256) (257-512) 513-1024 1025-2048 Резерв

	ΔF ≈ 4.0 кГц	ΔF ≈0.5 кГц							
ΔF, кГц	0-4.0	0.1-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0
26.12.06_18.02	1	1	1	1	1	1	1	1	0
10.02.07_06.04	5	9	1	1	0	0	1	2	0
20.02.07_18.02	2	3	0	1	0	0	11	1	0
Резерв (22-28.02.07)									
02.03.07_18.02	2	3	1	1	1	1	0	1	0
17.04.07_18.02	7	22	1	1	2	1	0	1	3
25.04.07_18.02	1	3	1	1	2	1	0	1	1
27.04.07_18.02	17	57	1	0	1	1	8	2	3
02.05.07_18.02	2	3	1	1	1	1	1	1	1
Резерв (07-15.05.07)									
16.05.07_18.02	1	4	0	1	2	1	1	2	1
28.05.07_10.06	5	37	0	0	2	0	19	2	1
31.05.07_18.02	1	9	1	0	2	0	1	2	3
04.06.07_18.04	6	37	1	1	1	1	0	9	5
06.06.07_18.04	3	19	1	0	1	1	23	70	5
07.06.07_06.06	5	14	1	1	1	1	35	31	7
07.06.07_18.04	3	12	1	1	1	1	11	27	50
08.06.07_06.02	7	14	1	1	1	1	66	17	8
08.06.07_18.04	3	20	1	1	1	1	1	24	45
09.06.07_06.04	5	10	2	1	1	1	1	71	15
09.06.07_18.02	15	56	1	1	1	1	0	138	59
11.06..07_06.06	9	24	1	1	1	1	1	185	23
11.06.07_18.04	9	45	0	1	1	1	1	123	68
12.06.07_06.06	3	8	1	0	1	1	1	98	14
12.06.07_18.04	2	15	0	1	1	1	1	58	104
13.06.07_06.06	1	7	0	0	1	1	1	82	76
14.06.07_06.06	6	29	0	0	1	1	0	59	60
14.06. .07_18.04	3	17	0	1	1	1	1	55	6
15.06..07_06.06	2	13	0	0	1	1	0	73	20
15.06. .07_18.04	3	23	0	0	1	0	0	38	73
16.06..07_06.06	1	2	1	1	1	0	1	29	22
17.06. .07_18.04	2	10	0	0	1	0	0	21	134
20.06..07_06.06	6	15	1	1	1	0	1	58	67
21.06..07_06.06	2	6	1	1	1	1	1	16	42
21.06. .07_18.04	3	19	0	1	1	1	1	105	84
23.06..07_06.06	2	7	1	1	1	0	1	15	47
23.06. .07_18.04	5	20	1	1	1	0	1	90	95
24.06..07_06.06	3	8	0	0	1	0	1	5	28
24.06. .07_18.04	10	47	0	0	1	1	0	81	76
25.06..07_06.06	9	24	1	1	1	0	1	14	61
25.06. .07_18.04	5	30	0	0	1	0	0	100	56
27.06. .07_18.04	1	10	0	0	1	0	0	37	11
28.06..07_18.04	1	5	0	0	1	0	0	10	3
01.07.07_06.06	1	3	0	0	1	0	1	5	2
03.07.07_18.02	2	16	0	0	1	0	0	9	4
04.07.07_06.06	3	8	0	0	0	0	0	7	2
04.07.07_18.02	2	17	0	0	0	0	0	30	6
05.07.07_06.06	2	8	0	0	0	0	0	4	3

05.07.07._18.02	3	21	0	0	0	0	0	37	8
06.07.07_06.06	1	3	0	0	0	0	0	12	6
06.07.07_18.02	1	13	0	0	0	0	0	30	6
08.07.07_18.02	1	7	0	0	1	0	1	5	3
17.07.07_18.04	2	11	0	0	1	0	0	24	4
18.07.07_18.04	1	11	0	0	0	0	0	33	7
27.07.07_18.04	4	20	0	0	0	0	6	2	1
09.08.07_06.10	2	7	1	1	0	0	0	1	1
Резерв (10-30.08.07)									
31.08.07_18.02	4	17	1	1	0	0	0	3	1
01.09.07_06.10	9	30	1	1	0	0	0	2	0
03.09.07_06.06	3	12	0	0	0	0	0	16	0
25.09.07_06.10	14	42	0	0	0	0	0	3	1
19.10.07_18.04	2	10	0	0	0	0	1	5	8
21.10.07_18.02	2	7	0	0	0	1	1	16	3
28.10.07_18.02	8	28	0	0	0	1	1	4	1
29.10.07_	6	16	1	1	0	1	1	4	1

Из данных, приведенных в табл. 5, следует, что при развитии дефекта типа прогара рабочих лопаток ТГГ наиболее раннее проявление неисправности ГТУ наблюдалось в низкочастотной области в зоне первых гармоник частоты вращения ротора газогенератора (ΔF_1=0.1-05 кГц), начиная с 01.02.07, затем в середине апреля, Id =56.7 (от 17.04.07), что можно объяснить появлением динамического дисбаланса и эксцентриситета, возможно вследствие легкого задевания. Затем выбросы дискриминанта нарастающей амплитуды появились в полосах частот ΔF_6=2.5-3.0 кГц (Id =66 от 08.06.07) и ΔF_8=3.5-4.0 кГц (Id =104 от 08.04), как реакция подшипников на данное повреждение. Вторичные эффекты развития повреждений ГТУ, наблюдавшиеся в высокочастотной области в июне-месяце, связанные с прогаром рабочих лопаток ТГГ, носили лавинообразный характер.

Наибольшие отклонения дискриминанта от нормы начали развиваться в полосе 3.0-3.5 кГц с 04.06.07, достигнув 11.06.07 значения Id =185. Далее деградационные процессы развивались вяло, т.к. основные разрушения лопаточного аппарата, влияющие на состояние подшипниковых узлов, завершились к июлю-месяцу. Тем не менее, останов ГТУ на ремонт был произведен только 29.10.07, т.е. оборудование пребывало в неисправном состоянии примерно 4.5 месяца.

Таблица 6

Локализация источников повышенной виброреактивности по тренду значений дискриминантов виброскорости корпуса ГТУ ***при эксплуатационном повреждении роликового подшипника ТВД*** *на интервале эксплуатации 26.12.06 -13.05.07. Эталон - 26-29.12.06. (Выборочные данные).*

(1-2) (3-4) (5-8) (9-16) (17-32) (33-64) (65-128) (129-256) (257-512) 513-1024 1025-2048 Резерв

	ΔF ≈ 4.0 кГц	ΔF ≈0.5 кГц							
ΔF, кГц	0-4.0	0.1-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0
26.12.06_18.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1
03.01.07_18.01	2	3	2	1	1	1	4	1	1
10.01.07_18.02	2	2	2	1	1	2	7	1	2
11.01.07_18.02	1	1	1	1	1	1	5	0	1
15.01.07_06.02	0	0	1	1	1	1	2	0	1
Резерв с 16.01.07 по 15.02.07									
16.02.07_18.02	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Резерв с 17.02.07 по 20.02.07									
21.02.07_18.01	1	3	1	1	1	1	1	1	0
23.02.07_18.02	2	4	2	1	1	1	2	0	4
24.02.07_06.03	1	2	2	1	1	1	1	1	3

27.02.07_18.02	1	3	2	1	1	1	1	1	1
06.03.07_06.00	1	1	1	1	1	1	3	0	1
06.03.07_18.00	4	15	1	1	1	1	2	1	1
07.03.07_06.00	1	1	1	1	1	2	3	0	1
08.03.07_17.59	1	1	1	1	0	0	0	1	1
12.03.07_18.00	2	6	1	1	1	1	1	1	0
13.03.07_06.03	1	1	1	2	1	1	4	1	0
13.03.07_18.01	2	5	1	1	1	1	2	1	0
14.03.07_06.03	3	7	2	1	2	1	2	2	0
14.03.07_18.01	3	9	1	1	1	1	2	1	0
15.03.07_18.01	2	3	0	1	1	1	1	1	0
27.03.07_18.02	1	1	1	1	2	1	0	6	1
28.03.07_06.00	0	0	1	1	1	1	0	1	1
28.03.07_18.00	1	2	0	1	2	1	0	6	1
29.03.07_18.00	2	2	2	1	1	1	0	1	1
30.03.07_18.00	3	7	1	1	1	1	0	6	1
01.04.07_06.00	1	1	1	1	1	1	0	0	1
01.04.07_18.00	1	1	2	1	2	1	0	8	1
02.04.07_06.00	1	0	1	1	1	1	0	0	1
02.04.07_18.00	2	3	1	1	1	2	1	4	2
03.04.07_06.00	1	3	1	1	2	2	1	5	1
03.04.07_18.00	2	5	2	3	3	2	1	4	2
05.04.07_06.00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
05.04.07_13.11	2	5	1	1	2	3	1	6	1
06.04.07_06.00	1	1	1	1	1	2	1	1	1
06.04.07_18.00	2	4	1	1	1	2	1	1	1
10.04.07_18.00	2	6	1	1	1	1	0	2	1
11.04.07_18.00	1	4	1	1	1	1	0	2	1
12.04.07_06.00	3	8	1	1	1	1	0	1	1
12.04.07_18.00	1	3	1	1	1	2	0	1	1
13.04.07_18.00	1	5	1	1	1	2	0	2	1
14.04.07_06.00	0	1	1	1	1	1	0	0	1
14.04.07_18.00	1	4	1	1	1	1	0	5	1
15.04.07_0600	1	1	1	1	1	1	0	1	1
15.04.07_18.00	2	4	1	1	1	1	1	3	1
16.04.07_06.00	0	0	0	1	1	1	1	0	0
16.04.07_18.00	2	3	0	1	1	1	6	10	2
17.04.07_06.00	1	2	1	1	1	2	2	4	1
17.04.07_18.00	4	10	1	1	1	1	1	32	2
18.04.07_06.00	6	16	0	1	1	1	0	13	2
18.04.07_18.00	3	7	1	1	1	2	0	6	3
19.04.07_06.00	3	7	1	1	1	2	0	10	1
19.04.07_18.00	3	8	1	1	1	1	2	19	3
20.04.07_06.00	0	3	1	1	1	1	1	5	1
20.04.07_18.00	1	9	0	1	1	1	1	4	1
21.04.07_06.00	0	1	1	1	1	1	1	1	1
21.04.07_18.00	1	3	1	0	1	1	3	3	1
22.04.07_06.00	0	0	1	0	1	1	1	0	1
22.04.07_18.00	1	3	1	1	2	1	1	2	3
23.04.07_06.00	1	1	1	0	1	1	1	0	1
Резерв с 24.04.07 по 27.04.07									
28.04.07_18.00	1	1	1	1	1	1	1	0	1
02.05.07_06.00	0	0	1	1	1	1	3	1	1
05.05.07_18.00	1	3	1	1	1	1	1	1	1
09.05.07_06.00	2	4	1	1	1	1	0	0	1
13.05.07_06.00	1	4	0	1	1	1	0	0	1

Как следует из табл.6, процесс разрушения роликового подшипника начался в конце марта 2007 г., достиг максимума 17.04.07 и завершился 21.04.07. Максимальные значения дискриминантов локализуются в зоне оборотных 0.1-0.5 кГц (Id=16.0) и в зоне высоких частот: 2.5-3.0 кГц (Id =7.0) и 3.0-3.5 кГц (Id =31.5), что приблизительно соответствует диапазону частот проявления в вибросигнале дефекта внутреннего кольца роликового подшипника ТВД в полосе частот, включающей комбинационные частоты (15.67 Fр-твд ± k Fр-твд). Частотная полоса проявления данного дефекта с учетом нестабильности оборотов и наличия высших гармоник модуляционной частоты охватывает диапазон частот ≈ от 2.5 до 3.5 кГц. В данный диапазон попадает также вторая гармоника частоты дефекта внутреннего кольца шарикового подшипника компрессора высокого давления (КВД) 2Fвк-шп-квд=17.76 Fр-квд. Частотная полоса проявления данного дефекта с учетом нестабильности оборотов может охватывать диапазон частот ≈ от 3.0 до 3.2 кГц.

Повышенная виброреактивность точки ТГГ-гор на подшипниковых частотах происходила на фоне роста виброреактивности в зоне оборотных частот из-за отклонения формы линии вала двигателя от номинальной.

Выводы

В статье показано, что для эффективного контроля текущего технического состояния машинного оборудования по данным корпусных измерений вибрации, раннего обнаружения дефектов и локализации источников повышенной виброреактивности процедура вибромониторинга должна опираться на информацию, содержащуюся в параметрах вибросигнала, чувствительных к выбросам и малым изменениям амплитуды вибраций. Этим требованиям отвечает алгоритм вибромониторинга на основе оценки изменений безразмерных S-дискриминантов клиппированных по амплитуде узкополосных вибросигналов в рабочем диапазоне частот измерительной системы.

Основное внимание уделено новому методу локализации источников повышенной реактивности вибрации, т.е. выявлению частотных диапазонов максимальной изменчивости вибросигнала по сравнению с эталонным при развитии эксплуатационных повреждений, который базируется на результатах параллельного узкополосного дискриминантного анализа корпусных вибраций машинного оборудования.

Показано, что различные дефекты по-разному влияют на изменчивость амплитуд вибрационных параметров в различных частотных диапазонах при зарождении и развитии эксплуатационных повреждений, в связи с чем для определения частотного диапазона с повышенной скоростью изменения (увеличения) амплитуды вибрации в конкретной измерительной точке с помощью дискриминантного анализа предложено использовать новый термин – локализация частотного диапазона повышенной реактивности вибрации, т.е. виброреактивности. Предложенный метод локализации источников позволяет выявить частотные диапазоны максимального изменения параметров вибрации (роста амплитуды или выбросов амплитуды) при деградации состояния узлов машинного оборудования с вращающимися и неподвижными элементами, причастными к формированию рабочих процессов.

В статье приведены иллюстративные материалы использования двух модификаций метода локализации источников для раннего обнаружения эксплуатационных повреждений ГТД (прогара соплового аппарата, рабочих лопаток и роликового подшипника турбины высокого давления). Таблицы виброреактивности позволяют визуально оценить ситуацию, связанную с отклонением технического состояния ГТУ от нормы и скоростью развития повреждения для оперативного принятия решения по дальнейшей эксплуатации объекта.

Параллельный анализ трендовых характеристик S-дискриминантов узкополосной вибрации машины в удобной для интерпретации и документирования форме в виде матрицы с цветным представлением результатов обработки вибрационной информации позволяет обеспечить решение несколько проблем: автоматизацию процедуры вибромониторинга, раннее обнаружение эксплуатационных повреждений, оценку скорости их развития, первичную идентификацию неисправностей и установление причинно-следственных связей их развития со временем наработки.

Результаты работы могут быть использованы не только для обнаружения эксплуатационных повреждений узлов вращения, но и повреждений неподвижных элементов конструкции, не влияющих на виброактивность машинного оборудования в широкой полосе частот и на оборотных частотах в диапазоне формирования заводских уставок, а потому не поддающихся обнаружению стандартными вибрационными методами.

Литература

1. ГОСТ 25364-97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений. – М.: Стандарты, 1997.
2. ISO 13373-1:2002. Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration condition monitoring. Part 1: General procedures.
3. ГОСТ Р 52526-2006. Установки газотурбинные с конвертируемым авиационным двигателем. Контроль состояния по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Госстандарт, Москва, 2006.
4. Соколова А.Г.Алгоритм вибромониторинга машинного оборудования с адаптацией к базовому состоянию / Контроль. Диагностика. 2005. № 11. С.30-40.
5. Asja Sokolova, Felix Balitsky. On some critical machinery Vibration monitoring algorithm and its application for incipient fault detection and localization / Diagnostyka Nr 3(47) / 2008, PTDT (Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej) Wydziale Nauk Technicznych Polskiej Akademii Nauk. / ISSN 1641-6414 / P.121-124.
6. Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я. Вибромониторинг машинного оборудования и раннее обнаружение эксплуатационных повреждений / Вестник научно-технического развития. Исследования, инновация, внедрения. www.vntr.ru № 7 (11), 2008. С.45-50.
7. Randall R.B., Antoni J. And Sawalhi N. Application of Spectral Kurtosis to bearing fault detection in rolling element bearings, Eleventh International Congress on Sound and Vibration (ICSVII), St.Petersburg, 2004.
8. Antoni, J. The Spectral Kurtosis: A useful tool for characterizing nonstationary signals. Mechanical Systems and signal Processing, vol. 20(2), 2006, pp.282-307.
9. Antoni, J. and Randall, R.B. The Spectral Kurtosis: application to the surveillance and diagnostics of rotating machines. Mechanical Systems and signal Processing, vol. 20(2), 2006, pp.308-331.
10. Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я., Брусиловский Ю.В., Минкин И.В., Изотов А.В., Вишняков С.А., Морозов О.В. Программный комплекс дискриминантного анализа вибраций как средство раннего обнаружения эксплуатационных повреждений газотурбинных установок / Вестник научно-технического развития. Исследования, инновация, внедрения. www.vntr.ru № 8 (12), 2008. С.66-72.
11. Asja Sokolova, Felix Balitsky. Rolling bearing field fault detection and diagnostics technique to employ for gas turbine unit casing vibration / Abstracts of Papers of The Fifth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies CM 2008 / MFPT 2008. 15-18 July, 2008 / BINDT (The British Institute of Non-Destructive Testing) // The Edinburgh Conference Centre Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland, UK // P. 31.

Поступила: 31.11.09.