

УДК 621:534

РАННЕЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ УЗЛОВ ГТД ПО ДАННЫМ МНОГОМЕРНОГО ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА КОРПУСНОЙ ВИБРАЦИИ

© Ася Григорьевна Соколова, Феликс Янович Балицкий,
Галина Владимировна Долаберидзе, Марина Анатольевна Иванова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

fbalitsky@gmail.com, agsokolova@gmail.com

Аннотация. В статье представлена информация о применении метода многомерного дискриминантного анализа вибрации для раннего обнаружения скрытых эксплуатационных повреждений узлов газотурбинных установок компрессорных газоперекачивающих агрегатов с приводом от газотурбинного двигателя в условиях измерения вибрационных сигналов на корпусных конструкциях агрегата. Приведены результаты диагностических исследований авиационного газотурбинного двигателя ПС-90 по данным корпусных измерений вибрации с целью разработки и практического применения метода многомерного дискриминантного анализа вибраций для раннего обнаружения скрытых дефектов вращающихся и неподвижных элементов узлов газотурбинных установок в рабочих условиях.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, вибромониторинг, обнаружение скрытых дефектов, локализация источников, многомерный дискриминантный анализ.

1. Введение

Известно, что зарождение и развитие деградиционных 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 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 возрастали при ухудшении технического состояния узла. При этом выделение полезной информации о текущем техническом состоянии узла в процессе его деградации, как правило, происходит в условиях недоступности непосредственного измерения колебаний на диагностируемом узле, в условиях перекрестного взаимодействия вращающихся элементов конструкции машины, маскировки полезного сигнала высоким уровнем помех.

В работе приведены результаты диагностических исследований авиационного газотурбинного двигателя ПС-90 по данным корпусных измерений вибрации с целью разработки и практического применения метода многомерного дискриминантного анализа вибраций для раннего обнаружения скрытых дефектов узлов газотурбинных установок компрессорных газоперекачивающих станций.

2. Особенности диагностирования конверсионных газотурбинных двигателей в наземных условиях компрессорных станций

К особенностям диагностирования конверсионных газотурбинных двигателей (ГТД) в наземных условиях компрессорных газоперекачивающих станций (КС) с помощью

стационарных систем сбора и обработки информации [1], существенно осложняющих процедуры вибромониторинга и диагностики и снижающих достоверность диагноза, относятся следующие факторы:

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

Анализ статистики отказов авиационного двигателя ПС-90 в наземных условиях компрессорных газоперекачивающих станций показал, что скрытые повреждения вращающихся и неподвижных элементов турбины высокого давления типа эрозии, коррозии, сколов и прогаров соплового и лопаточного аппарата под действием высоких температур камеры сгорания, износ подшипников качения обычно обнаруживаются или путем визуального осмотра при проведении планового технического обслуживания (ТО) или дефектации при ремонте после снятия машины с эксплуатации.

Перечисленные факторы делают малоэффективным обычный спектральный анализ сигналов виброскорости при обнаружении и локализации скрытых дефектов машинного оборудования, и в частности газотурбинных двигателей, и практически невозможным использование традиционных для обычных роторных машин методов обнаружения и диагностики эксплуатационных повреждений таких узлов газотурбинных установок (ГТУ) как подшипники качения, базирующихся, например, на применении метода амплитудной демодуляции высокочастотной вибрации, неприменимого к измеряемым вибросигналам на корпусе установки.

На рисунке 1 изображен газотурбинный двигатель ПС-90 и указано расположение измерительных точек на корпусе двигателя для измерения корпусных вибраций ГТУ.

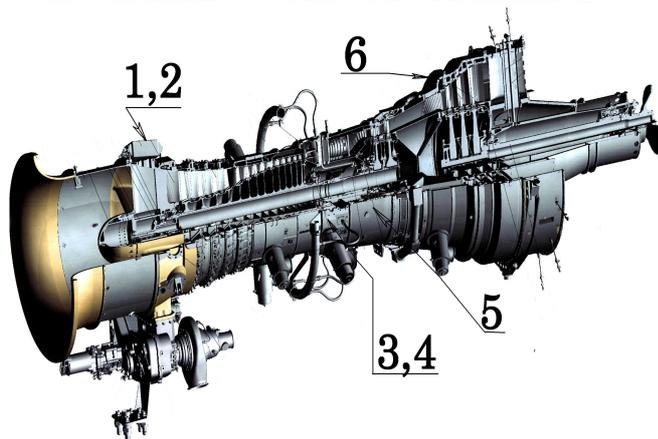


Рис. 1. Положение измерительных точек на корпусе ГТД ПС-90: точки 1 и 2 (Квх-верт и Квх-гор) - в двух взаимно-перпендикулярных направлениях измерения (вертикальном и горизонтальном) в сечении на входе компрессора газогенератора (ГГ); точки 3 и 4 (Кз-верт и Кз-осев) - в зоне камеры сгорания на выходе компрессора в вертикальном и осевом направлениях измерения; точка 5 (ТГГ-гор) - в зоне турбины высокого давления (ТВД) газогенератора (ГГ) в горизонтальном направлении; т.6 (СТ-осев) - в зоне силовой турбины (СТ) в осевом направлении.

На рисунках 2-4 приведены фотографии нескольких типовых скрытых повреждений узлов газотурбинного двигателя, несовместимых с его дальнейшей эксплуатацией.

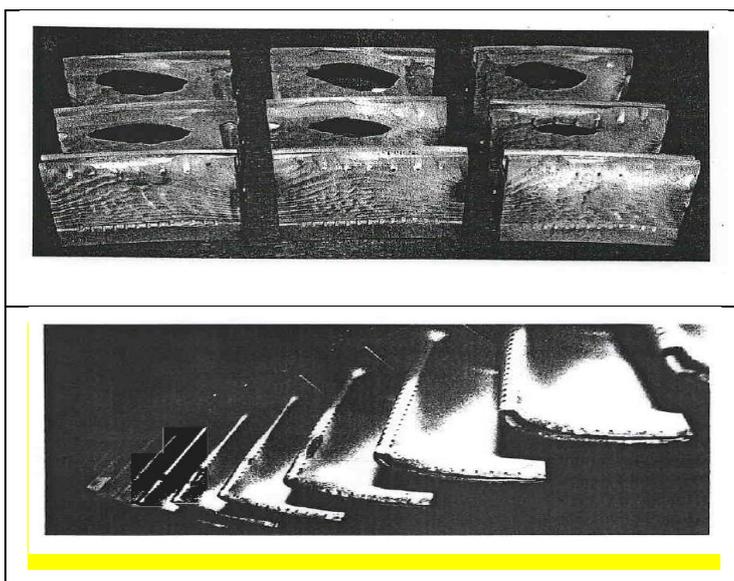


Рис. 2. Фото сквозного прогара разрезного кольца 1-ой ступени соплового аппарата (*вверху*) и рабочих лопаток (*внизу*) 1-ой ступени ТВД двигателя ПС-90.

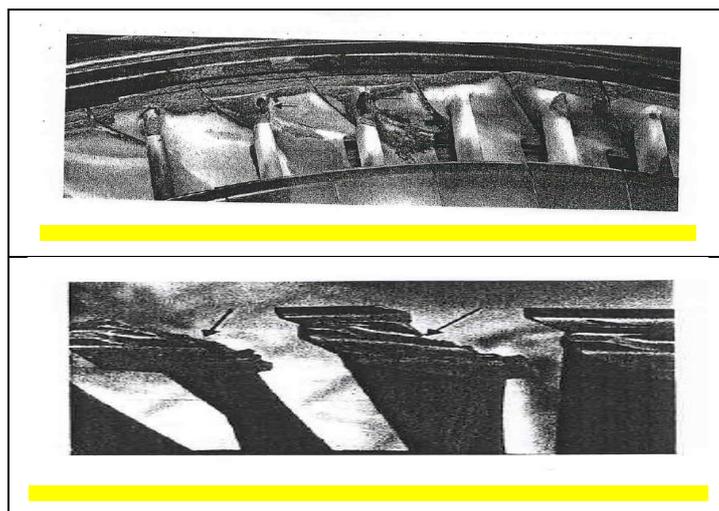


Рис. 3. Фото сквозного прогара сопловых лопаток (*вверху*) и поломки бандажных полок (*внизу*) рабочих лопаток 2 ст. ТВД двигателя ПС-90

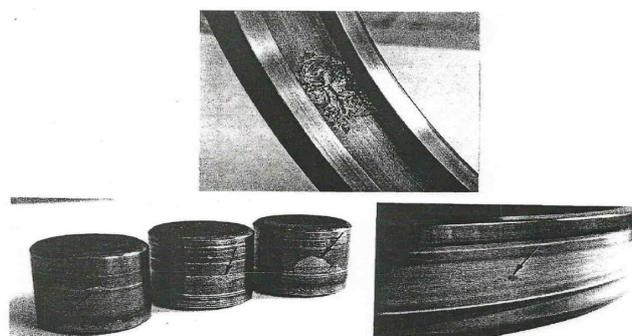


Рис. 4. Вид выкрашивания материала наружного кольца (фото *вверху*) и шелушений на поверхностях роликов и внутреннего кольца роликового подшипника ТВД двигателя

Для обнаружения зарождающихся эксплуатационных повреждений машинного оборудования, локализации диапазонов частот максимальной виброреактивности и установления причинно-следственных связей изменения вибрационных параметров машины со временем наработки в каждой измерительной точке целесообразно производить параллельный мониторинг виброреактивности по данным оценки значений дискриминантов клиппированных по амплитуде вибросигналов в фиксированных узких полосах частот [2].

Способ представления информации в методе вибромониторинга по данным дискриминантного анализа вибрации состоит в многомерном цветном представлении тренда значений дискриминантов широкополосной и узкополосной вибрации в табличной форме в координатах: полоса частот, время, амплитуда.

Таблицы виброреактивности позволяют в текущий момент времени визуально оценить ситуацию, связанную с отклонением технического состояния объекта от нормы, для оперативного принятия решения по дальнейшей эксплуатации объекта.

Параллельный съём и обработка информации в различных точках корпуса двигателя в сечениях, близких к проблемным зонам, позволяет обнаружить повреждение установки на ранней стадии, локализовать поврежденный узел и проследить за развитием неисправности со временем наработки. Помимо этого многомерный дискриминантный анализ позволяет установить временную и причинно-следственную связь развития различных неисправностей машинного оборудования для прогнозирования аварийной ситуации.

Ниже приведены примеры использования разработанного в ИМАШ РАН программного комплекса дискриминантного анализа вибраций [2-4] для обнаружения эксплуатационных повреждений узлов двухвального авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) ПС-90 в составе ГТУ-16 ГПА компрессорных газоперекачивающих станций.

3. Использование разработанного в ИМАШ РАН программного обеспечения для целей вибромониторинга машинного оборудования, обнаружения скрытых дефектов и локализации поврежденных узлов

Данные многомерного дискриминантного анализа в сжатом виде в логарифмическом масштабе амплитудных значений дискриминантов I_d виброскорости в 3-х измерительных точках корпуса двигателя: Квх-верт, Кз-верт, ТГГ-гор, - в сжатой табличной форме представлены на рисунке 5 на интервале наблюдения 01.02-27.07.2007 в приложении к обнаружению повреждений элементов компрессора и турбины высокого давления (ТВД) двигателя ПС-90 ГПА-51 Торжокской компрессорной станции (КС).

Каждая из таблиц представлена в координатах: № измерения (по оси ординат), соответствующий дате измерения на упомянутом временном интервале, № частотной полосы (по оси абсцисс): от 1 до 9. Значения дискриминантов I_d представлены в логарифмическом масштабе по основанию 2 в цветовой гамме в соответствии с бар-графом, изображенным справа от таблиц также в логарифмическом масштабе.

В полосе №1 приведены данные дискриминантного анализа в широкой полосе частот: 0-4.0 кГц.

В полосах № 2-9 приведены данные дискриминантного анализа в узких полосах частот $\Delta F = 500$ Гц: № 2 - (0.1-0.5) кГц; № 3 - (0.5-1.0) кГц; ...; № 9 - (3.5-4.0) кГц. Для наглядности данные таблиц приведены к одному масштабу.

Эталоны сформированы по первым четырем измерениям и представлены в верхней части каждой таблицы.

По данным таблиц можно сделать предварительную оперативную оценку чувствительности корпусных измерительных точек к ухудшению технического состояния с наработкой и по максимальной реакции, соответственно, определить местоположение проявления наибольшей изменчивости вибраций (виброреактивности), полосы частот наибольшей виброреактивности и, соответствующих источников возбуждения для

последующего анализа с помощью детализированных таблиц виброреактивности и трендовых характеристик дискриминантов с привязкой к номеру и дате измерения.

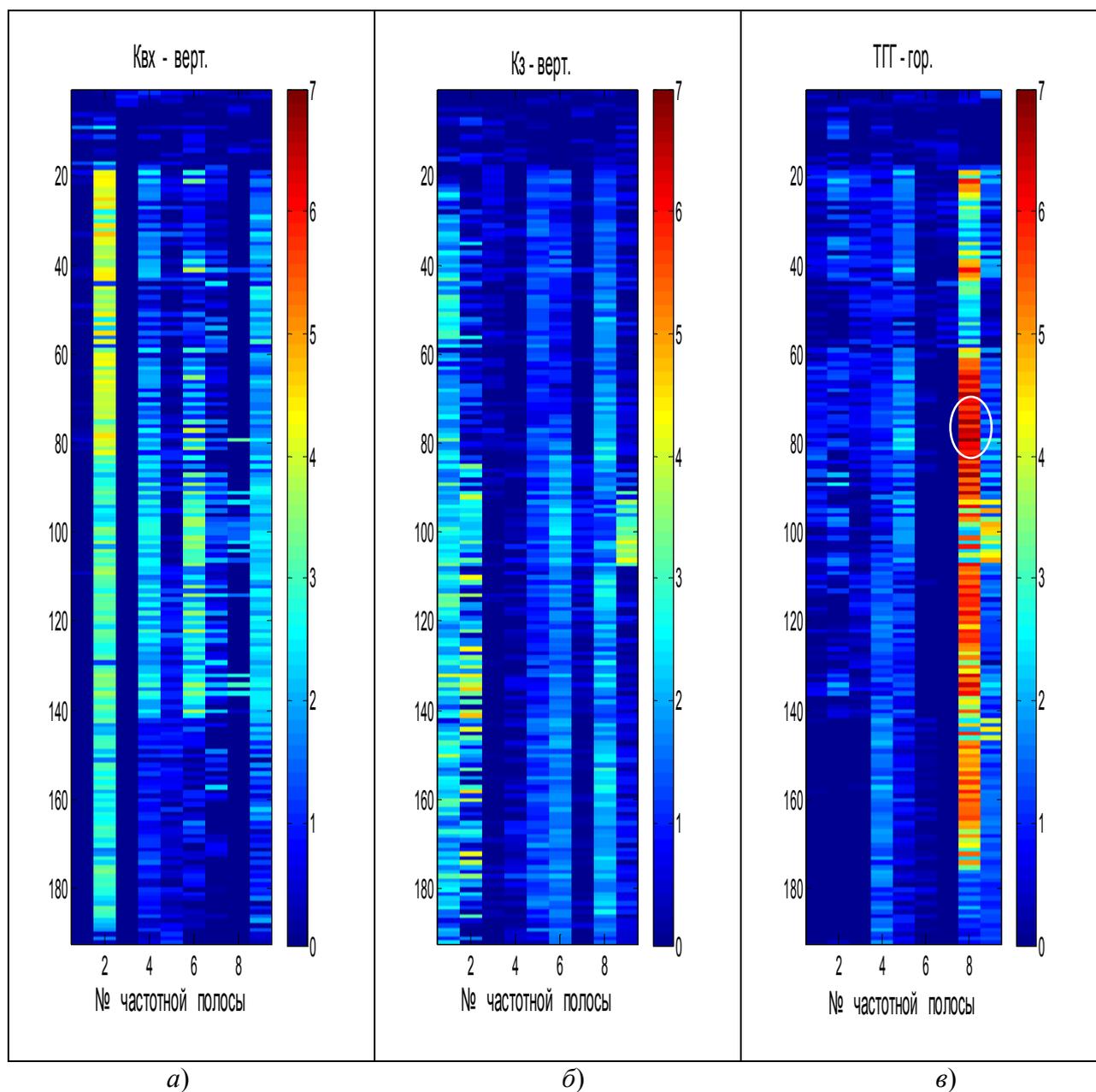


Рис. 5. Таблицы виброреактивности двигателя ПС-90 в точках: Квх-верт (а), Кз-верт (б), ТТГ-гор (в) при развитии повреждений лопатки компрессора (а) и прогара соплового аппарата и разрезного кольца турбины высокого давления (в)

Анализ данных многомерного дискриминантного анализа вибраций, приведенных на рисунке 5, позволяет сделать следующие выводы.

По данным дискриминантного анализа вибраций точки корпуса Квх-верт, приведенным на рисунке 5, а, следует вывод о достаточно высокой виброреактивности корпуса двигателя в данной точке в основном в диапазоне оборотных частот. Действительно, в данном конкретном случае развитию прогаров элементов ТВД предшествовало появление вырыва лопатки 4-ой ступени компрессора, что, вероятно, явилось причиной роста амплитуд гармоник частоты вращения вала компрессора. Именно проявление данного дефекта хорошо отслеживается ростом дискриминанта в частотной полосе № 2 (в зоне оборотных частот 0.1-0.5 кГц) в измерительной точке Квх-верт (рисунок 5, а). На прогар соплового аппарата (СА)

ТВД (в зоне частот 3.0-4.0 кГц) данная точка прореагировала слабо. Из этой же таблицы следует, что необходимо обратить внимание на полосы с № 4 (1.0-1.5 кГц) и № 6 (2.5-3.0 кГц), реагирующие на износ подшипниковых узлов компрессора.

Немного слабее на повреждения элементов компрессора и ТВД среагировала точка Кз-верт (рисунок 5, б), находящаяся в зоне больших помех от камеры сгорания, хотя при этом появилась реакция на повреждении ТВД в полосе № 9 (3.5-4.0 кГц).

Однако к прогару неподвижных элементов соплового аппарата ТВД наиболее чувствительной оказалась расположенная в зоне турбины точка ТГГ-гор (рисунок 5, в). В полосе частот (3.0-3.5 кГц) значения виброреактивности в окрестности измерения № 79 (от 15.05.07) достигают величины $\sim 2^{10}$, в то время как в т. Кз-верт в высокочастотной области дискриминант $\leq 2^6$. Область наибольшей виброреактивности в т.ТГГ-гор выделена на рисунке 5, в белой линией.

При визуальном контроле состояния двигателя в процессе его разборки были обнаружены повреждения лопаточного аппарата 4-ой ступени компрессора, а также прогар элементов 2-й ступени и разрезного кольца СА ТВД.

Как следует из приведенных выше таблиц дискриминантов, основные различия между параметрами вибрации в нормальном и дефектном состояниях двигателя ПС-90 при прогаре неподвижных элементов соплового аппарата наблюдаются в зоне высоких частот, в основном, в полосе частот (3.0-3.5 кГц), и практически никак не влияют на виброреактивность корпуса в т. ТГГ-гор на частотах вращения ротора газогенератора.. Это говорит о том, что стандартными методами вибромониторинга, ориентированными на контроль превышения уровней вибраций на оборотных частотах в полосе частот до 1 кГц, обнаружить данный вид повреждения невозможно.

В то же время метод дискриминантного анализа не только позволяет обнаружить зарождение дефекта (за 2.5 месяца до вынужденного останова оборудования), оценить рост виброреактивности, но и оценить характер развития повреждения [3-4], проявляющегося в виде свиста при срывных колебаниях потока газа на краях отверстий при сквозном прогаре лопаток, что в спектре вибрации т. ТГГ-гор отображается в виде пика резонансного типа в высокочастотной области (см. на рисунке 9 картинку от 15.05.07), хаотично меняющего свою амплитуду и местоположение на частотной оси от измерения к измерению.

Для оперативной интерпретации результатов дискриминантного анализа вибрации при реализации процедуры вибромониторинга оборудования диагностом-оператором на рабочем месте в комплекс программ, разработанный в ИМАШ РАН, включены способы представления дискриминантов в графической и в развернутой табличной формах, содержащих подробную информацию о дате проведения измерений и числовых значениях дискриминантов в заданных полосах частот.

Ниже в усеченном виде приведены фрагменты таблицы детализированных значений дискриминантов виброскорости в т. ТГГ-гор в координатах: частотная полоса и дата проведения испытаний упомянутого выше объекта (ГПА-1 КС «Торжокская») при развитии повреждений лопатки компрессора и повреждений ТВД: прогара неподвижных элементов – лопаток 2-й ступени и разрезного кольца 1-ой ступени соплового аппарата турбины высокого давления, явившихся причиной съема двигателя с эксплуатации.

Амплитудные значения дискриминантов в таблице представлены в числовом виде в линейном масштабе и в цвете в логарифмическом масштабе по основанию 2 в соответствии с приведенным бар-графом.

В первой строке таблицы (под № 0) приведены эталонные значения дискриминантов в каждой из частотных полос, усредненные на периоде с 4-7.02 07. В следующих строках (под № № 1, 2) приведены значения дискриминантов для эталонных измерений.

Далее - (№ № 21-23) для начала сквозного прогара элементов соплового аппарата ТВД; (№ № 78-80) при максимальном повреждении СА; (№ № 191-192) за сутки до останова двигателя на ремонт. Максимальное значение дискриминанта I_d вибрации в полосе частот 3.0-3.5 кГц \approx в 1000 раз превышает эталонное.

**Фрагменты таблицы дискриминантов
виброскорости в точке корпуса ТГГ-гор двигателя ПС-90
при развитии эксплуатационных повреждений компрессора и соплового аппарата ТВД**

Объект: ТГГ-гор ГПА-51 Торжок-2007
 Расчеты проведены с 01.02.2007 5:59:59 по 27.07.2007 6:00:00
 Лямбда = 1.5
 Усреднение по 4 частям
 Тип клиппирования: по модулю Эталон 04-07.02.07 Fд=10240 Гц

0-2
2-4
4-8
8-16
16-32
32-64
64-128
128-256
256-512

№	Дата/полоса (кГц)	Ш.П.	0.1-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4
0	Эталон	1.02	1.27	1.02	1.01	1.05	1.04	1	1.06	1.34
1	04.02.2007 5:59:59	0.66	0.06	1.11	0.83	1.17	1.52	1.1	1.46	4.26
2	04.02.2007 17:58:00	1.71	0.18	1.02	0.6	2.13	1.36	0.93	1.6	3.8

.....

21	17.04.2007 17:58:00	2.09	9.11	3.09	0.99	6.21	0.35	0.38	381.48	8.76
22	18.04.2007 6:00:00	2.29	3.98	3.49	1.99	5.23	1.3	0.61	143.49	3.69
23	18.04.2007 17:58:00	1.32	6.18	2.1	2.31	5.17	0.79	1.18	157.4	3.44

.....

78	15.05.2007 5:59:59	2.03	0.52	1.86	2.26	7.22	0.75	0.13	565.65	2.58
79	15.05.2007 17:57:59	2.96	3.05	1.69	1.91	17.17	0.26	0.17	1033.65	17.22
80	16.05.2007 5:59:59	2.02	4.29	1.41	3.15	8.44	0.79	0.24	411.21	7.62

.....

191	26.07.2007 17:58:00	0.46	0.31	0.3	2.84	2.23	0.7	0.02	3.51	3.88
192	27.07.2007 6:00:00	0.63	1.39	0.43	6.08	1.84	0.6	0.08	2.33	2.91

Для получения более детального представления о характере изменения виброреактивности корпуса двигателя на всем интервале наблюдения (04.02.07-13.05.07) при развитии дефекта типа прогара соплового аппарата ТВД, на рисунках 6-8 приведены графики тренда дискриминантов Id вибрации точек корпуса Квх-верт, Кз-верт и ТГГ-гор в девяти полосах частот при пороге клиппирования $P=1.5\sigma_n$.

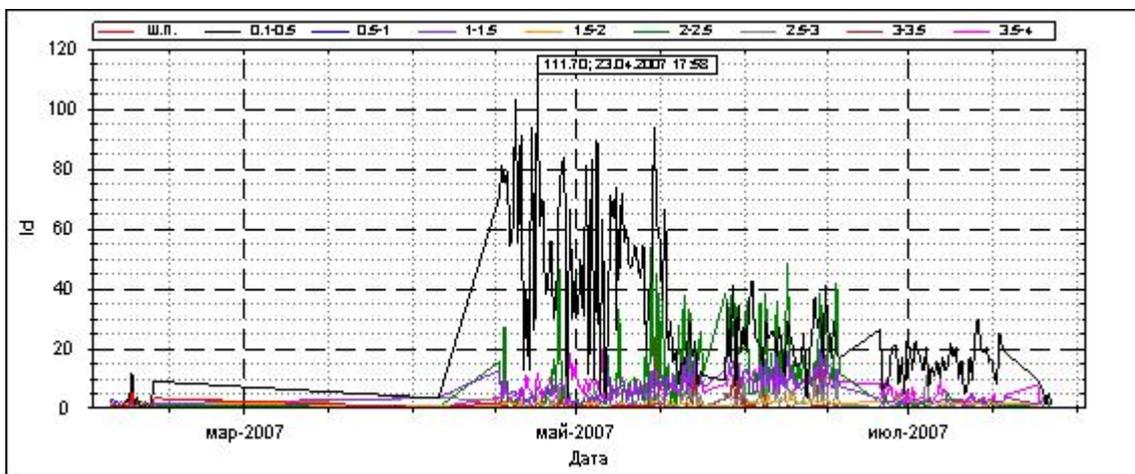


Рис. 6. Тренд дискриминанта Id вибрации в точке корпуса Квх-верт

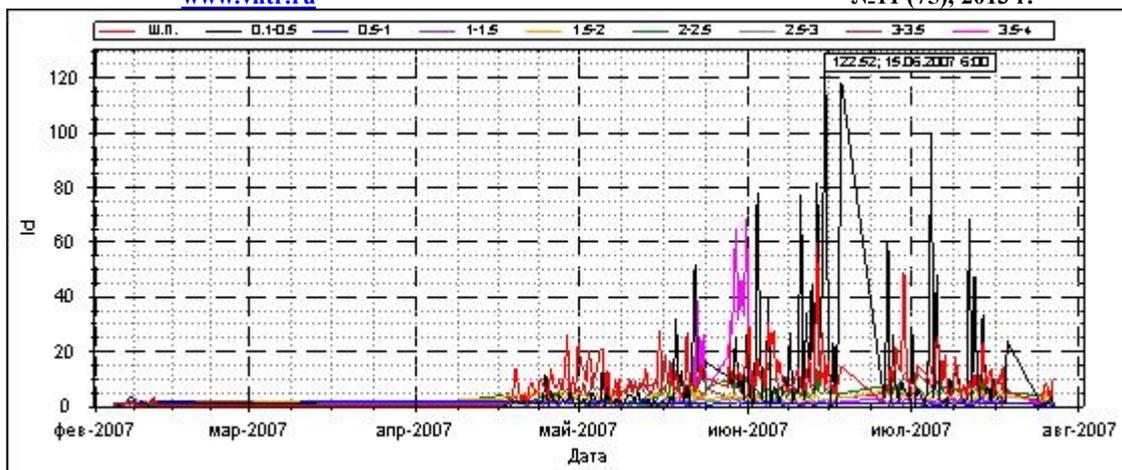


Рис. 7. Тренд дискриминанта Id вибраций в точке корпуса Кз-верт

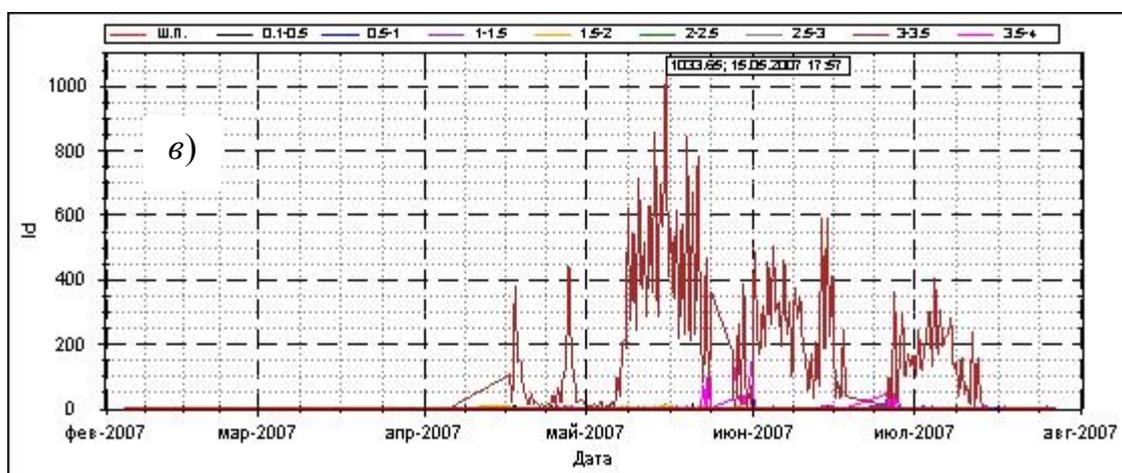


Рис. 8. Тренд дискриминанта Id вибраций в точке корпуса ТГГ-гор

Из рисунков следует, что вибрации корпусных точек ГТД избирательно реагируют на появление эксплуатационных повреждений в различных узлах двигателя. Если в трендовых характеристиках дискриминантов вибраций в точках Квх-верт и Кз-верт (рисунки 6, 7) доминируют гармоники частоты вращения ротора компрессора с максимальным значением дискриминанта $Id \approx 120$, то в точке ТГГ-гор (рисунок 8) доминирует дискриминант в полосе 3.0-3.5 кГц, обусловленный появлением нестационарных колебаний на частотах, не связанных с частотой вращения вала, генерируемых автоколебаниями потока газа через сквозные отверстия в прогоревших лопатках СА ТВД с максимальным значением $Id \approx 1000$. Во всех остальных полосах частот виброреактивность в т. ТГГ-гор близка к эталонной.

Таким образом, многомерный дискриминантный анализ зарекомендовал себя как удобный и надежный инструмент не только раннего обнаружения и локализации дефектов машины в эксплуатационный период без ее разборки, но и установления причинно-следственных связей развития повреждений в различных узлах сложного оборудования.

На рисунке 7 представлены спектры виброскорости в точках Квх-верт, Кз-верт и ТГГ-гор, синхронно измеренные на двигателе ПС-90 в исходном для данного цикла измерений состоянии (эталонном), при максимальном проявлении прогаров элементов соплового аппарата турбины высокого давления, и в последний день функционирования газоперекачивающего агрегата перед остановом на ремонт.

Анализ спектров вибраций в этих же измерительных точках для эталонного состояния, при прогаре элементов ТВД и накануне останова двигателя, как это следует из рисунка 7, не позволяют сделать однозначные выводы о появлении скрытых дефектов.

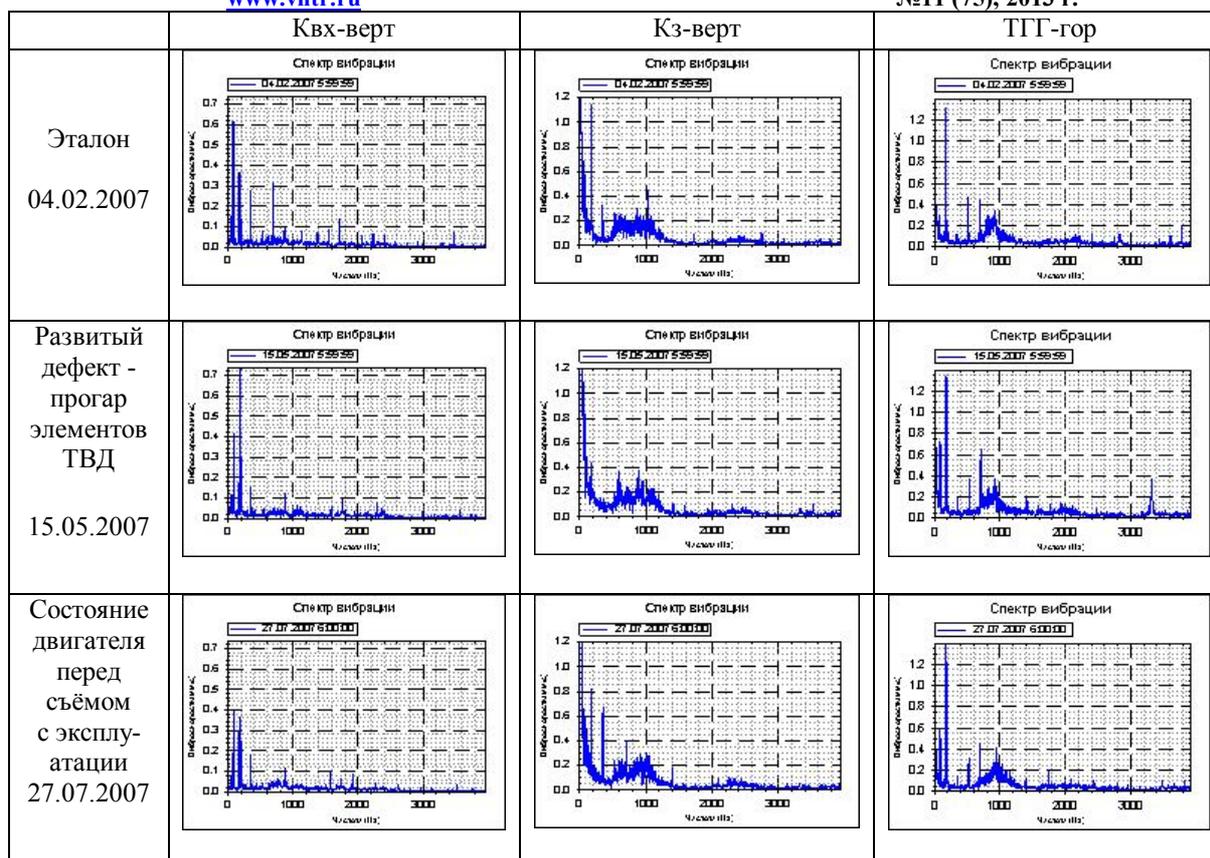


Рис. 9. Спектры виброскорости в точках корпуса Квх-верт, Кз-верт, ТГГ-гор двигателя ПС-90 в 3-х различных состояниях

Присутствие в спектрах виброскорости в стандартном диапазоне измерения 4.0 кГц, в основном, гармоник частот вращения роторов и практическое отсутствие частот, характерных для подшипников качения, лопаточных частот компрессоров и турбин и, тем более, частот проявления эксплуатационных дефектов типа прогара вращающихся и неподвижных элементов узлов турбины, отсекает возможность раннего обнаружения скрытых дефектов узлов ГТД, лимитирующих ресурс оборудования. И лишь появление вторичных признаков существенных разрушений, приводящих к изменению положения линии вала (из-за дисбаланса, эксцентриситета, перекоса осей), проявляющихся в сигнале виброскорости в зоне первых гармоник частот вращения роторов с запаздыванием по времени, позволяет рассчитывать на аварийное срабатывание штатной системы вибромониторинга по стандартной методике в диапазоне частот 10-1000 Гц.

Заключение

- В работе показано, что для эффективного контроля технического состояния газотурбинных установок (ГТУ) по данным корпусных измерений вибрации процедура вибромониторинга должна опираться на информацию, содержащуюся в вибросигналах в низкочастотном диапазоне частот вращения роторов, но и в высокочастотном диапазоне возбуждения колебательных процессов в узлах машины, подверженных скрытым деградиционным процессам, бесконтрольное развитие которых с большой вероятностью влечет за собой аварийный останов машины.
- Данные многомерного дискриминантного анализа позволяют сделать сравнительную оценку чувствительности корпусных измерительных точек к ухудшению технического состояния с наработкой, определить ориентировочное местоположение дефектного узла,

диапазон частот наибольшей виброреактивности и, соответствующих ему источников возбуждения.

▪ Многомерный дискриминантный анализ позволяет установить временную и причинно-следственную связь развития различных неисправностей машинного оборудования

▪ Сравнение реакции спектральных и дискриминантных характеристик корпусных вибраций на воздействие скрытых эксплуатационных повреждений узлов ГТД демонстрирует высокую чувствительность дискриминантов к зарождающимся дефектам, что является основанием для их включения в перечень контролируемых штатной системой вибромониторинга параметров вибрационных процессов в машинах.

▪ Для реализации процедуры вибромониторинга и раннего обнаружения эксплуатационных повреждений машинного оборудования типа ГТУ компрессорных станций, не всегда обнаруживаемых методом визуального осмотра (при проведении ТО), целесообразно использовать метод многомерного дискриминантного анализа вибраций для локализации источников виброреактивности в полосах частот проявления дефектов узлов, лимитирующих ресурс оборудования.

▪ 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 и диагностики скрытых дефектов.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52526-2006. Установки газотурбинные с конвертируемым авиационным двигателем. Контроль состояния по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Госстандарт, Москва, 2006.
2. Соколова А.Г. Метод локализации источников повышенной виброреактивности машинного оборудования по данным дискриминантного анализа в задачах вибромониторинга и диагностики неисправностей / Вестник научно-технического развития (www.vntr.ru) No 1 (29), 2010. С. 26-42.
3. Программное обеспечение виброакустического мониторинга машинного оборудования на основе метода S-дискриминантов / Серов А.А., Долаберидзе Г.В., Иванова М.А., Соколова А.Г., Власишен Ю.В.// Проблемы машиностроения и надежности машин. М.: Наука, 2012, № 2.- С. 91- 97.
4. Соколова А.Г., Долаберидзе Г.В., Иванова М.А., Балицкий Ф.Я. Практическое применение метода многомерного дискриминантного анализа для раннего обнаружения скрытых эксплуатационных дефектов газотурбинных установок на базе двигателя ПС-90 / Материалы XV Международной научно-практической конференции «Энергосбережение. Диагностика–2013», г. Димитровград, 26-28 марта 2013. - С. 261-272.