

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЖИМА ВЫБЕГА РОТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Шабаев В.М. (ОАО "Газтурбосервис")

Леонтьев М.К., Виноградов С.М., Потапова О.Ю. (Московский авиационный институт)

Представлены методики и результаты обработки сигналов, полученных при выбеге роторов двигателя ДР59 с помощью системы VibroNET 2.0. Сигналы записываются в режиме магнитографа - непрерывной оцифровки. Показана возможность определения резонансных режимов газотурбинного двигателя с высокой точностью. Предложена методика для диагностики состояния подшипников, основанная на резонансном усилении основных подшипниковых гармоник при прохождении резонансных зон.

1. Введение

Непрерывная оцифровка временного сигнала является одним из инструментов, которому в настоящее время начинает уделяться достаточно большое внимание разработчиками систем вибрационного контроля и диагностики. Возможность получения больших временных реализаций и появления мощных методов их обработки (каскадные диаграммы, спектральные карты, вейвлет анализ и др.) позволяет получать информацию, которая ранее была недоступна разработчикам газотурбинных двигателей и прочего вращающегося оборудования.

Авторами исследуется один из наиболее интересных режимов работы газотурбинного двигателя ДР59 – выбег, когда основные гармоники становятся незначительными, уровень шума снижается, открывая тем самым доступ к выделению слабых составляющих в вибрационном сигнале, обнаружить которые на основных режимах работы двигателя не представляется возможным. В основе лежит метод усиления составляющих вибрационного сигнала на резонансных режимах двигателя, положение которых определяется с очень высокой точностью и может быть подтверждено также и результатами математического моделирования.

Экспериментальные исследования проводились с помощью системы вибрационного контроля и диагностики VibroNET 2.0, используемой в качестве штатной системы для проведения контрольных и приемо-сдаточных испытаний в ОАО "Газтурбосервис".

Система представляет собой программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий сбор и обработку тахометрических, вибрационных, а также других процессных сигналов с датчиков, установленных на двигателе. В качестве аппаратной и программной платформы используются продукты компании National Instruments® - среда разработки LabVIEW®6.1, промышленные контроллеры стандарта PXI, а также 24-х разрядные платы стандарта PXI NI-4472.

Для математического моделирования использовалась программная система Dynamics R3.1 [1].

2. Определение резонансных режимов двигателя

2.1. Схема измерений

Схема расположения датчиков на двигателе представлена на рис. 1 Акселерометры с индексом Г в имени установлены в верхних точках, и имеют горизонтальное направление измерений. Акселерометры с индексом В установлены в горизонтальной плоскости и имеют вертикальное направление измерений.

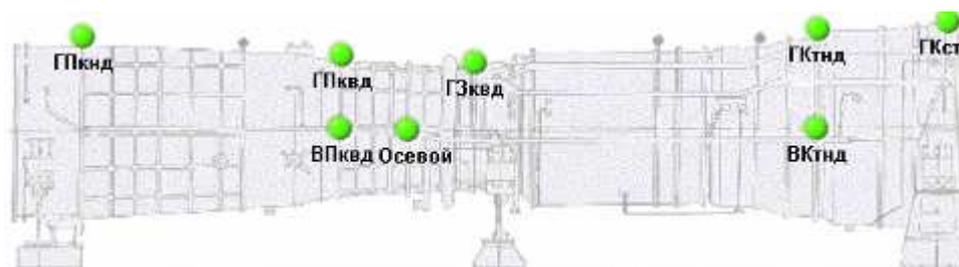


Рис. 1. Схема расположения датчиков

В процессе испытаний проводилась запись выбега роторов двигателя в режиме магнитографа. В результате формируется файл, который загружается для последующего анализа. Циклограмма выбега роторов, полученная после обработки этого файла данных представлена на рис.2. В верхней половине циклограммы представлены кривые изменения оборотов роторов. В нижней части – амплитудно-временные характеристики вибрационного сигнала для различных датчиков

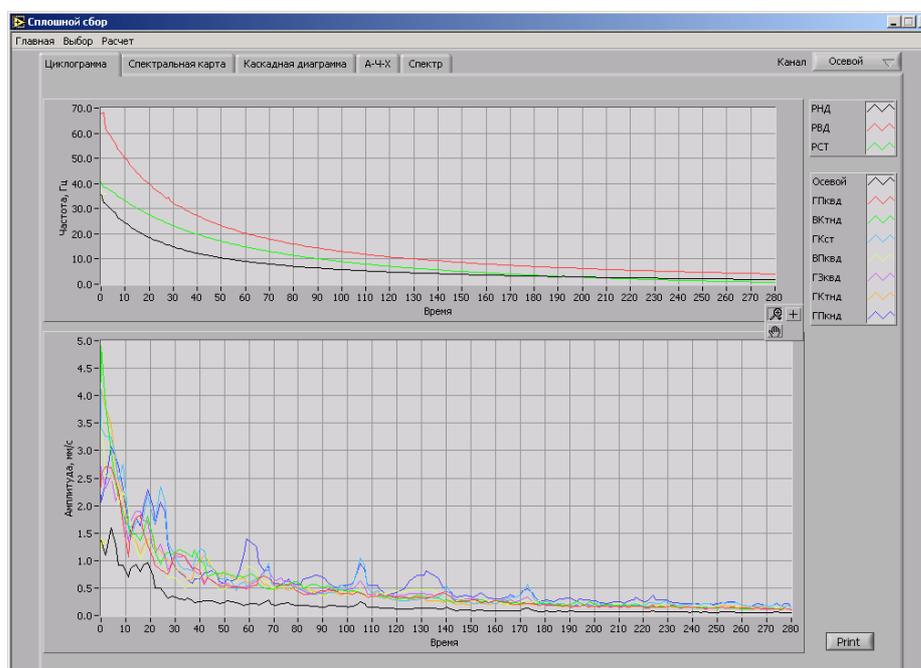


Рис.2. Циклограмма выбега роторов

2.2. Каскадные диаграммы

На рис. 3 показана каскадная диаграмма, полученная на выбега роторов. Можно практически сразу выделить зоны, которые соответствуют различным резонансным состояниям - 22 Гц, 37 Гц, 59 Гц. Один и тот же резонанс системы последовательно возбуждается различными возбудителями при достижении их частотой резонансной частоты (частоты собственных колебаний).

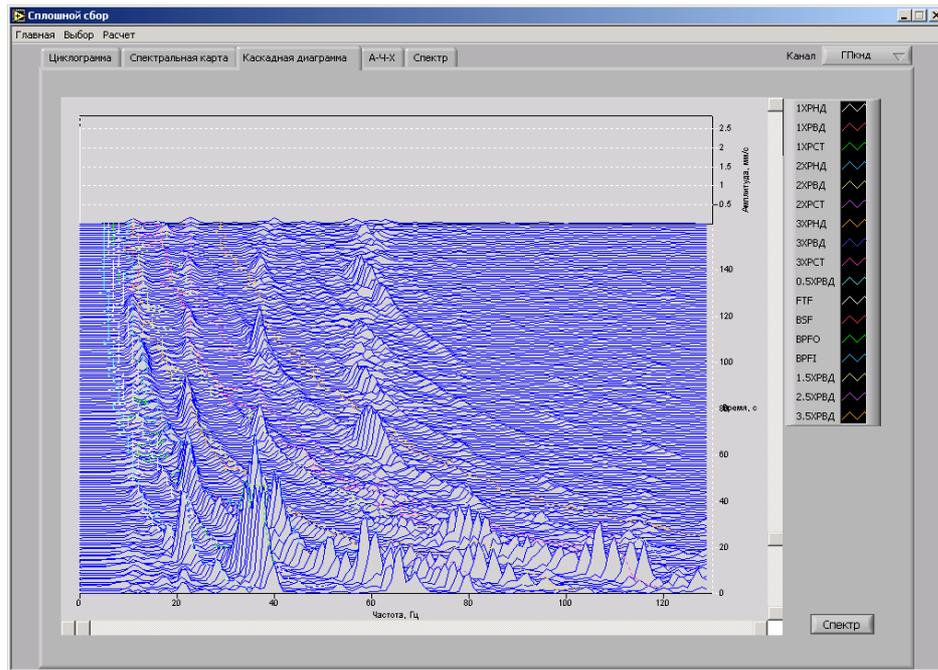


Рис. 3. Каскадная диаграмма, полученная на выбеге в режиме сплошного сбора. Канал ГПкнд. Выделена частотная область 0-130 Гц.

Использование средств системы VibroNET 2.0 для 3D визуализации каскадной диаграммы позволяет выделять достаточно уверенно и с высокой точностью и более слабые резонансные режимы, рис. 4,5,6,7.

Среди этих средств – вертикальные и горизонтальные скроллеры, возможность выделения необходимого частотного диапазона, выделения необходимого интервала времени (количества спектров), во всей записи выбега роторов.

Использование информации по разным каналам дает возможность получить достоверные значения резонансных частот исследуемой системы.

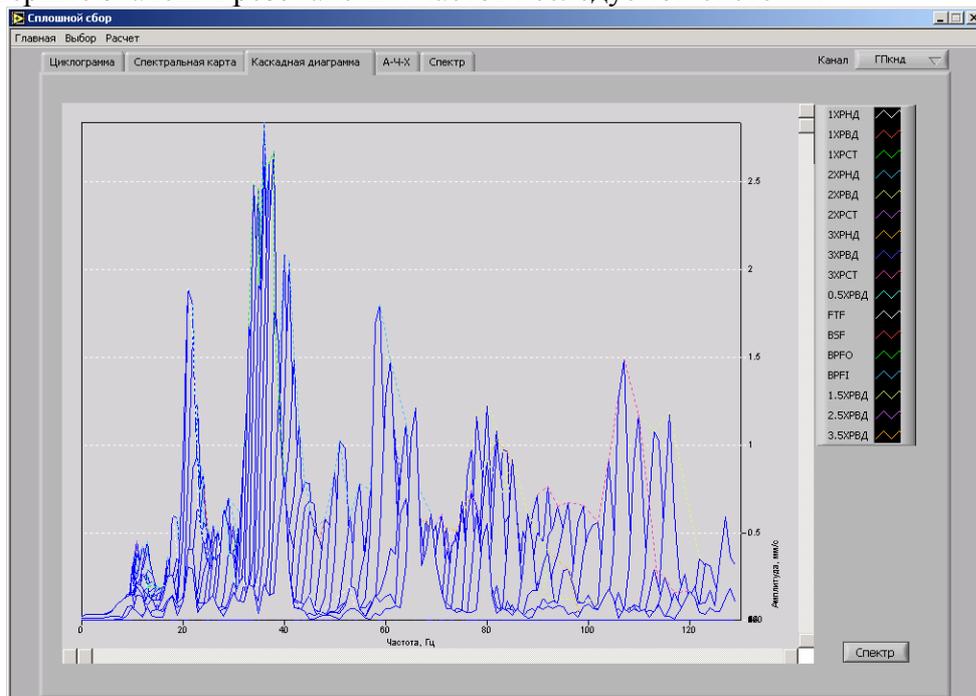


Рис. 4. Спектры каскадной диаграммы, наложенные друг на друга средствами 3D визуализации. Канал ГПкнд. Частотная область 0-250 Гц. Спектры с отсчетами 0-160.

Наложенные спектры на рис. 4 недостаточно разделены между собой. Это связано с наличием на переднем плане достаточно мощных резонансов с широкой “подшивкой”. Применением средств 3D визуализации можно отсечь сильные резонансы, чтобы выявить более слабые резонансные отклики динамической системы, не затеняющие общей картины, в том числе и резонансные зоны в других частотных диапазонах, рис.5, 6.

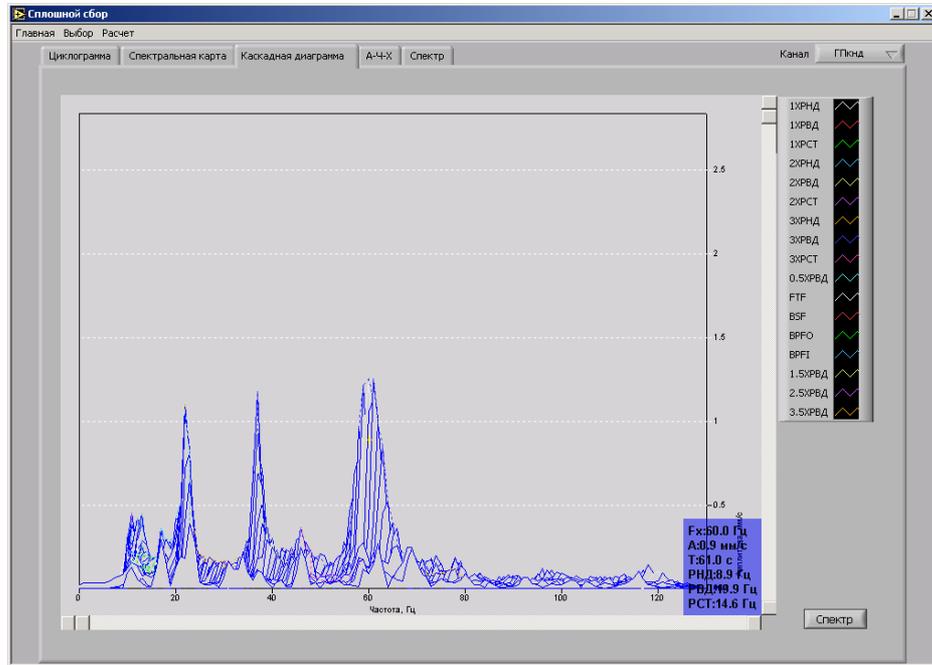


Рис. 5. Спектры каскадной диаграммы, наложенные друг на друга средствами 3D визуализации. Канал ГПкнд. Частотная область 0-130 Гц. Спектры с отсчетами 50-160

На рис. 6 показана каскадная диаграмма выбега роторов в высокочастотной области. Можно уверенно выделить резонансную зону в районе 1800 Гц последовательно возбуждаемую рабочими колесами роторов двигателя.

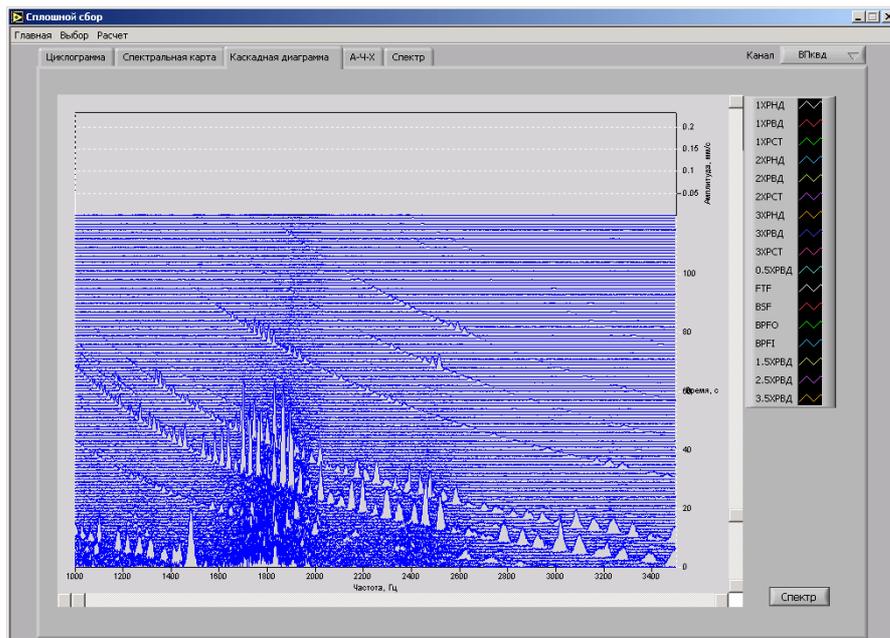


Рис. 6. Высокочастотная область на выбега роторов. Канал ВПквд.

2.3. Амплитудно-частотные характеристики

Дополнением к каскадным диаграммам являются огибающие гармоник (амплитудно-частотные характеристики), получаемые также по результатам сплошного сбора. Следует отметить, что на выбеге не происходит пересечение огибающих гармоник (гармоники достаточно хорошо разделены, хотя за этим надо также следить). В результате огибающие достаточно хорошо отражают резонансные состояния газотурбинного двигателя, рис. 7

Несомненен и тот факт, что по амплитуде резонанса можно следить об интенсивности (мощности) механизма возбуждения, связанного с той или иной причиной.

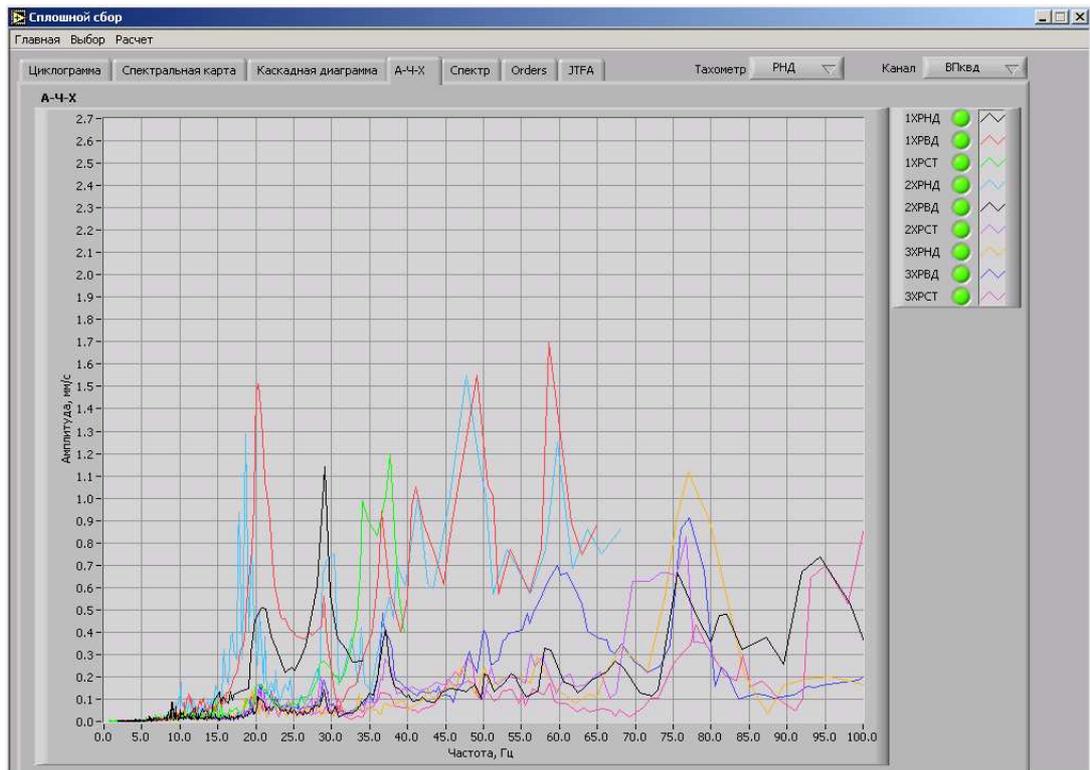


Рис. 7. Огибающие кратных гармоник ротора ВРД.
Хорошо видны резонансные состояния двигателя

2.4. Спектральные карты

Пожалуй, наиболее мощным и точным инструментом для решения задачи выявления резонансных режимов газотурбинных двигателей во всей их полноте являются спектральные карты. Пакет виртуальных инструментов Order Analysis Tools также разработан в компании National Instruments и адаптирован в систему VibroNET 2. Спектральные карты могут быть получены в различных сочетаниях параметров, рис. 8, рис. 9.

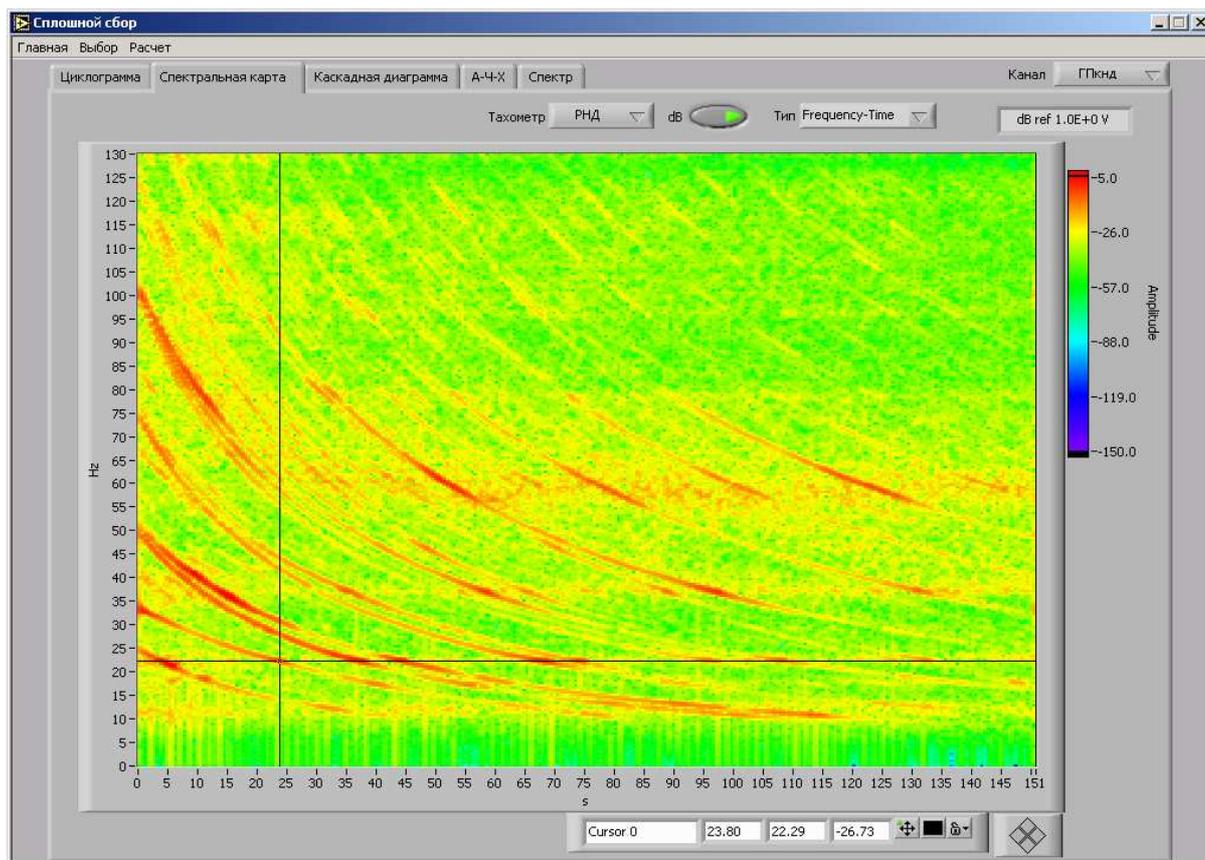


Рис. 8. Спектральная карта “Частота – время”.

На карте красным цветом выделяются все резонансные зоны, возбуждаемые в процессе выбега. Масштабируя шкалу цветности можно подстраиваться под конкретные резонансные режимы, усиливая или ослабляя их на спектральной карте. Далее используя линии курсора можно с высокой точностью определять резонансные частоты.

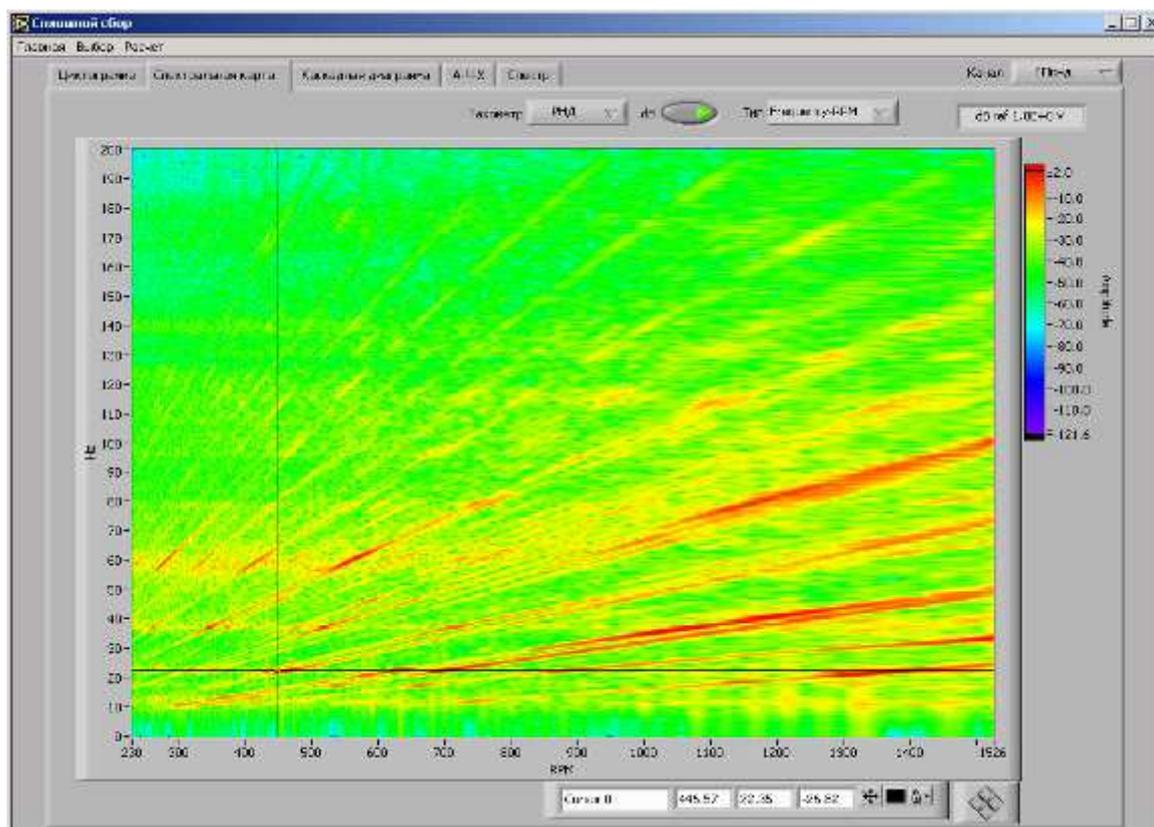


Рис. 9. Спектральная карта “Частота – обороты ротора”.

2.5. Резонансные характеристики двигателя ДР59Л

Применение средств системы VidroNET 2.0 – сплошного сбора на режиме магнитографа, 3D – визуализации каскадных диаграмм и огибающих, спектральных карт в различном виде - позволило получить достаточно точную информацию о резонансных зонах двигателя ДР59Л (№ Д00290475), таблица 1.

Таблица 1

№	Резонансная частота по различным каналам, Гц							
	Осевой	ГПкнд	ГПквд	ВПквд	ГЗквд	ГКтнд	ВКтнд	ГКст
1	11	12..13	11	11...12	11	11	11	11
2	22	17	17	20...21	17	17..18	20	17
3	26	22	22	29	20...22	22	30	22
4	37	37	37	36...37	37	35...37	37...38	37
5	50	47		48	47	47	47	
6	56	59...60	56...57	59	56	-	57	57...58
7	67...76	78...79		77	71	69...76	65...70	78...79
8	99	97	90...96	106...107	87...93	92...100	80...106	99
9	120	115...120	116..120	117...120	113...120	113...120	117...120	120
10		140	132			160	150	140
11		170			180	175	176	170

Следует отметить, что полученные резонансы соответствуют частотам собственных колебаний для системы с очень низкими частотами вращения роторов. Т.е. практически отсутствует влияние гироскопических эффектов, которые могут изменить

положение резонансных зон на высоких частотах вращения роторов – в основном в сторону увеличения частоты.

В таблице одинаковым цветом выделены каналы для вибропреобразователей, установленных в одном поясе двигателя (поперечной плоскости), но имеющих разное направление измерения вибрационных сигналов.

Можно отметить, что для датчиков, меряющих вибрации в вертикальной плоскости, значения частот для нижних резонансных зон выше по сравнению с направлением горизонтальным. Это полностью согласуется с условиями закрепления двигателя на стенде. Жесткая подвеска в вертикальном направлении и, практически, нулевая жесткость в горизонтальном направлении и определяют такое соотношение частот собственных колебаний.

Из таблицы видно, что погрешность экспериментально полученных демпфированных собственных частот колебаний достаточно мала и не превышает нескольких герц.

Очевидно, что данная информация является весьма важной для проектировщиков двигателей, ведущих отстройку узлов и деталей от резонансных режимов.

2.6. Идентификация математической модели двигателя ДР59Л по данным выбега

Одним из важных направлений в разработке алгоритмов диагностики технического состояния газотурбинных двигателей является моделирование их вибрационных характеристик. Так линейная модель двигателя может быть успешно использована для оценки влияния дисбалансов роторов на резонансное поведение двигателя и, в частности, в местах установки акселерометров. Нелинейные модели могут дать качественную картину влияния тех или иных дефектов (или их развития) на вибрационные характеристики двигателя.

Моделирование должно проводиться с помощью моделей, которые дают достаточно точные результаты в исследуемом диапазоне частот и которые могут быть применены для проведения анализа. Такие модели разрабатываются по чертежам двигателя, с последующей идентификацией модели по экспериментальным данным.

В таблице 2 представлено сравнение резонансных частот колебаний, полученных в эксперименте на выбеге роторов и в расчетной модели полноразмерного двигателя ДР59. Модель была создана в программной системе Dynamics R3.1 и идентифицирована по экспериментальным результатам (резонансным режимам двигателя, полученным в результате обработки выбега роторов). Идентификация в основном была проведена за счет учета анизотропии жесткостных свойств подвески двигателя в математической модели, и последующего изменения жесткости опорных узлов двигателя ДР59Л.

Таблица 2

№	Частоты собственных колебаний, об/мин				
	Эксперимент (из табл.1)	Результаты расчетов			
		Частоты демпфированной системы без вращения роторов	Критические частоты вращения РВД	Критические частоты вращения РНД	Критические частоты вращения СТ
1	660	676	676	676	676
2		847	847	847	847
	1020	1017 крут.			
3	1320	1238	1238	1238	1238
4	2220	2367	2366	2365	2365

5	2820	3011, 2837 прод.	3010	3007	3006
6	3480	3545, 3665	3544, 3662	3543, 3660	3543, 3660
7	4620	4632	4622	4604	4604
	5220...5400	5700 крут.	5246	5020	4963
8	5800...6400	6355, 6427	6176, 6460	5768	5578
9	6800...7200	6990, 7003, 7056	6739, 6813 7207	6527, 6730, 7238	-
10	8400...9000	8086, 8291	7812, 8557	-	-
11	9000...9600	9365, 9412, 9434	9178, 9711	-	-

Можно отметить достаточно хорошее совпадение полученных расчетных и экспериментальных оценок частот резонансных режимов, полученное в результате минимальных изменений параметров расчетной модели, полученной на основании чертежей и весовых оценок элементов конструкции.

Из таблицы также видно, что демпфирование и вращение незначительно меняет положение резонансных режимов практически для всех частот.

2.7. Использование режима магнитографа на выбеге для диагностики состояния подшипников

Сигналы от подшипников даже с достаточно развитым дефектом обладают незначительными амплитудами и часто маскируются в шуме.

Сигналы достаточно большого уровня, в несколько раз превышающие шум и, которые можно заметить в обычном спектральном анализе, чаще всего появляются в предаварийном состоянии, возможно, за несколько минут до полного разрушения подшипника со всеми вытекающими отсюда последствиями – разрушения лопаточных аппаратов, корпусов опор и т.д.

Система VibroNET 2.0 позволяет в какой-то мере решить проблему диагностики состояния подшипников, используя информацию, полученную на выбеге роторов в режиме магнитографа.

В основе диагностики лежит эффект резонансного усиления гармонических компонент, соответствующих основным подшипниковым частотам и их кратностям. Если для двигателя (нового или после ремонта) имеется соответствующая информация, то, сравнивая ее с аналогичной, полученной после нескольких тысяч часов непрерывной работы в процессе текущих регламентных работ, можно провести оценку состояния подшипников.

Очевидно, что если существует некоторая статистика по предельным значениям амплитуд на соответствующих резонансах, то с некоторой вероятностью можно прогнозировать и остаточный ресурс подшипника.

Данная методика предполагает получение информации на выбеге роторов (т.е. при останове двигателя).

На рис. 10, 11, 12, 13 показаны огибающие гармонических компонент, соответствующих основным подшипниковым частотам FTF, BSF, BPFO и BPFI промежуточного подшипника двигателя ДР59.

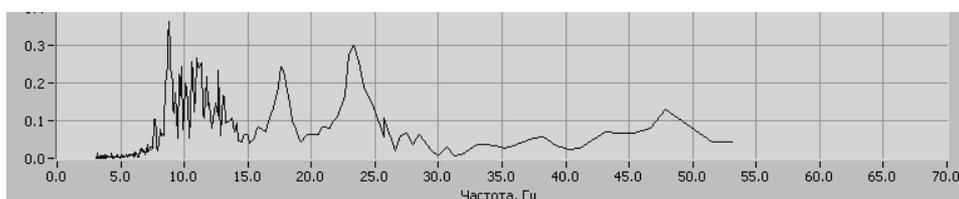


Рис. 10. Огибающая гармонических компонент с частотой FTF

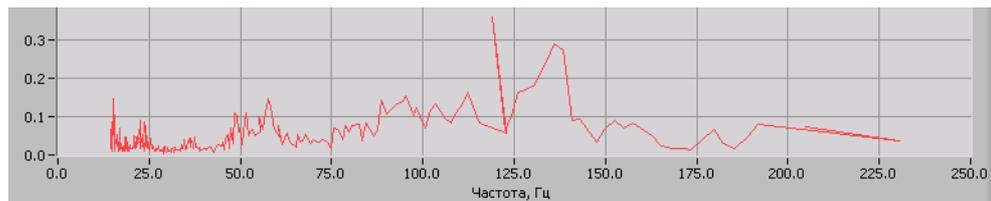


Рис. 11. Огибающая гармонических компонент с частотой BPF

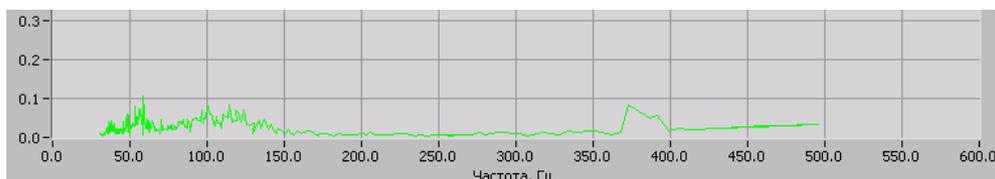


Рис. 12. Огибающая гармонических компонент с частотой BPFO



Рис. 13. Огибающая гармонических компонент с частотой BPF1

Практически на всех графиках для всех частотных компонент существуют резонансные усиления. Амплитуды резонансов находятся в диапазоне от 0.1 до 0.4 мм/сек.

Следует отметить, что появление резонансных усиления гармонических компонент с основными частотами подшипников уже говорит о том, что существуют начальные изменения в состоянии данного подшипника (предполагается, что для кондиционного подшипника не существует причин возбуждения колебаний с указанными частотами). Правда, следует также отметить, что даже для нового подшипника существует некоторый минимальный дисбаланс сепаратора, который может проявить себя резонансным усилением на частоте FTF, некоторая некруглость элементов качения, остаточные неровности после механической обработки и т.д.

3. Выводы

1. Разработан уникальный аппаратно-программный комплекс (VibroNET 2.0), и, в частности, позволяющий определять резонансные режимы сложных динамических систем ГТД на основе алгоритмов 3D визуализации и порядкового анализа результатов выбега роторов.

2. Полученные экспериментальные результаты позволяют проводить идентификацию математических моделей роторных систем, повышая их точность и достоверность. VibroNET 2.0 может быть использован различными КБ при проектировании, испытаниях и доводке новых двигателей, а также любого другого вращающегося оборудования.

3. На базе разработанных алгоритмов предложена методика диагностики состояния подшипников газотурбинных двигателей при выбега роторов. Данная методика основана на резонансном усилении гармонических компонент основных подшипниковых частот и может быть применена как аналог прибора ДИП, используемого для диагностики состояния межроторных подшипников.

4. Предлагается включать в вибрационный паспорт двигателя нового или после проведенного ремонта результаты измерений на режиме выбега роторов. При проведении всех регламентных работ на КС (при останове двигателя) предлагается

проводить сплошной сбор вибрационных сигналов на выбеге роторов (такой подход предполагает наличие на КС стационарной системы мониторинга, позволяющей проводить такие измерения).

3. Литература

1. Шабает В.М., Вахрушев В.Н., Виноградов С.М., Гаранин И.В. Леонтьев М.К. Стеновая система вибрационного контроля и диагностики газотурбинных двигателей. Научно-практическая конференция “Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments” Москва, Ноябрь 14-15, 2003 г
2. Леонтьев М.К., Иванов А.В., Дегтярев А.А. Программная система для расчета и анализа роторной динамики турбомашин Dynamics R3.1. Свидетельство об отраслевой разработке №2716. Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Государственный информационный центр информационных технологий. Министерство образования Российской Федерации.