

В.М. Шабаев., А.С. Казанцев

ОАО “Газтурбосервис”, г. Тюмень

М.К. Леонтьев, И.В. Гаранин

Московский авиационный институт, г. Москва

В.А.Карасев

Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ), г. Москва

ВИБРОДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПРИ МОНТАЖЕ И СБОРКЕ ТЯЖЕЛЫХ РОТОРНЫХ УЗЛОВ

Рассмотрены результаты экспериментального исследования вибросигналов от локальных повреждений роликового подшипника из-за перекосов, ударов или чрезмерного усилия монтажа и сборки в составе тяжелого ротора. Эксперименты проведены при медленном вращении ротора газотурбинного двигателя на балансировочном стенде в условиях сборочного цеха предприятия. Применена комплексная цифровая обработка сигналов по алгоритмам спектрального анализа, полосовой фильтрации и вейвлет-фильтрации.

Введение

При монтаже и сборке тяжелых роторов с подшипниками качения, например в большеразмерных газотурбинных двигателях, возможны локальные повреждения тел качения, колец и сепаратора подшипников из-за перекосов, ударов или чрезмерного усилия монтажа. Повреждения имеют вид задира, риски, вмятины, скола. Возможно выпучивание материала в зонах повреждений. После монтажа ротора в машине подобные повреждения пока не обнаруживаются без разборки машины. В эксплуатации подобные повреждения могут стать причиной дальнейших повреждений подшипников, при которых работа машины становится опасной. Поэтому разработка технологии диагностики подобных сборочно-монтажных повреждений подшипников без разборки машины является весьма актуальной. В статье приведены результаты экспериментальной работы по исследованию возможности обнаружения сборочно-монтажных повреждений подшипников тяжелых роторов методами вибрационной диагностики с использованием сигналов акселерометров, установленных снаружи на корпусных деталях на значительном расстоянии от подшипника, при медленном вращении ротора.

Объект исследования

Объектом исследования явился роликовый подшипник ротора ВД газотурбинного двигателя ДЖ-59Л2, установленного в условиях сборочного цеха предприятия на балансировочном стенде типа ВМ3000, рис.1. Основные технические параметры кондиционного подшипника приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип подшипника	6.32132 БТ2
Число роликов	24
Диаметр ролика, мм	20
Длина ролика, мм	20
Рабочая длина ролика, мм	18
Разноразмерность роликов по ТУ, мм	< 0,002
Весовая нагрузка на подшипник, кг	619
Радиальный зазор подшипника после посадки внутреннего кольца, мм	0,04 - 0,099
Посадка наружного кольца	свободная
Смазка подшипника	жидкая

Наружное кольцо подшипника установлено в корпус, изготовленный в виде стакана. Стакан консольно закреплен на плоской опоре (люльке) стенда, имеющей форму пластины толщиной 30 мм. Акселерометры установлены вертикально на этой пластине. До места измерений сигнал от подшипника проходит через несколько соединений. Это достаточно сложный путь, длина которого составляет около 0,5 м. Основные подшипниковые частоты имеют следующие значения: $FTF = 0.45x_{fv}$, $BPIF = 13.2x_{fv}$, $BPFO = 10.8x_{fv}$, $BSF = 4.95x_{fv}$.

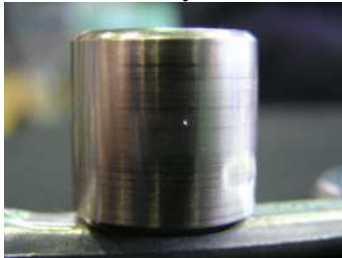


Рис. 1. Общий вид ротора на балансировочном стенде со стороны испытуемого подшипника. Видны акселерометры на люльке стенда

Дефекты подшипника

Работа проводилась с одним и тем же новым кондиционным подшипником. В подшипнике заменяли один новый ролик на поврежденный ролик. Ролики, на которые наносились повреждения, были взяты от подшипника, возвращенного из эксплуатации. Все они имели износ на краях. На эти ролики были нанесены дополнительные повреждения, характерные при монтаже. Фотографии повреждений роликов и их описания по данным замеров до и после испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

Лыска по всей длине ролика  Глубина 0,015-0,025 мм	Короткая лыска на части длины ролика  Глубина 0,018 мм Длина 4,5 мм
Риска по всей длине ролика  Глубина 0,046 мм Ширина 0,64 мм	Короткая риска на части длины ролика  Глубина 0,023 мм Длина 5 мм Ширина 0,3-0,5 мм. Выпучивание материала у края риски до испытаний 0,063 мм, после испытаний 0,018 мм
Три укола + один укол  Диаметр укола 0,3-0,5 мм Глубина 0,064 мм Выпучивание материала у края укола 0,006 мм Одиночный укол расположен на угле 215° по окружности относительно зоны трех уколов	Один укол  Диаметр укола 0,5 мм. Глубина 0,053 мм

Измерительная аппаратура и программное обеспечение

Использовали акселерометры типа КД-41, ВК-315, РА-032 и другие.. Для первичной обработки использовалась вибрационная аппаратура компании National Instruments – плата NI-4472. Плата имеет восемь одновременно опрашиваемых каналов. Каждый канал содержит собственный 24-х разрядный АЦП. Для записи и обработки вибрационных сигналов использовался программный комплекс VibroNET R2.1 [1], написанный на языке LabVIEW 6.1. Длительность временных реализаций на установившихся режимах составляла от 30 до 40 секунд. Частота дискретизации по каждому каналу - 10 кГц.

Виды испытаний

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе проводились предварительные испытания для оценки условий испытаний. Оценивались вибрационные, акустические, электромагнитные помехи от действующего в цеху оборудования, а также проводился анализ прохождения слабых вибрационных сигналов от кондиционного подшипника к месту измерения вибрации. На втором этапе проводились замеры сигналов от подшипников при вращении ротора с частотой 180 об/мин (режим 1) и с частотой 240 об/мин (режим 2). Точность поддержания частоты вращения составила 1%.

Анализ помех от действующего оборудования в цехе

Акселерометры и аппаратура оказались чувствительны к воздействиям со стороны оборудования, работающего в цехе. Наиболее сильное влияние проявилось на низких частотах до 10 Гц, на частоте 50 Гц и ее гармониках.

Прохождение вибрационных сигналов от подшипника к месту измерения

Прохождение слабых вибрационных сигналов от подшипника к месту измерения вибрации исследовали ударным тестом на стенде без ротора. Простукивали деревянным брусом весом около 80 грамм легкими ударами по цилиндрической поверхности одиночного ролика, установленного в нижней части наружной дорожки подшипника, с расстояния ~ 30 мм. Частота ударов составила около 1 удара в секунду. При простукивании по ролику в спектрах сигналов датчика выделяется несколько резонансных зон (таблица 3). Максимальная амплитуда откликов на удары на резонансных частотах в 5-10 раз превышала уровень сплошного спектра.

Таблица 3

Резонансная частота, Гц	260	700	760	1050	2500	4300
Амплитуда, мм/сек	0,0002	0,00017	0,0004-0,0007	0,00015 - 0,0006	0,0003	0,0002
Амплитуда, g	0,033			0,0004		

Вибрационные сигналы от кондиционного подшипника

Осциллограммы не фильтрованных сигналов кондиционного подшипника в целом имеют шумовой характер, рис. 2.

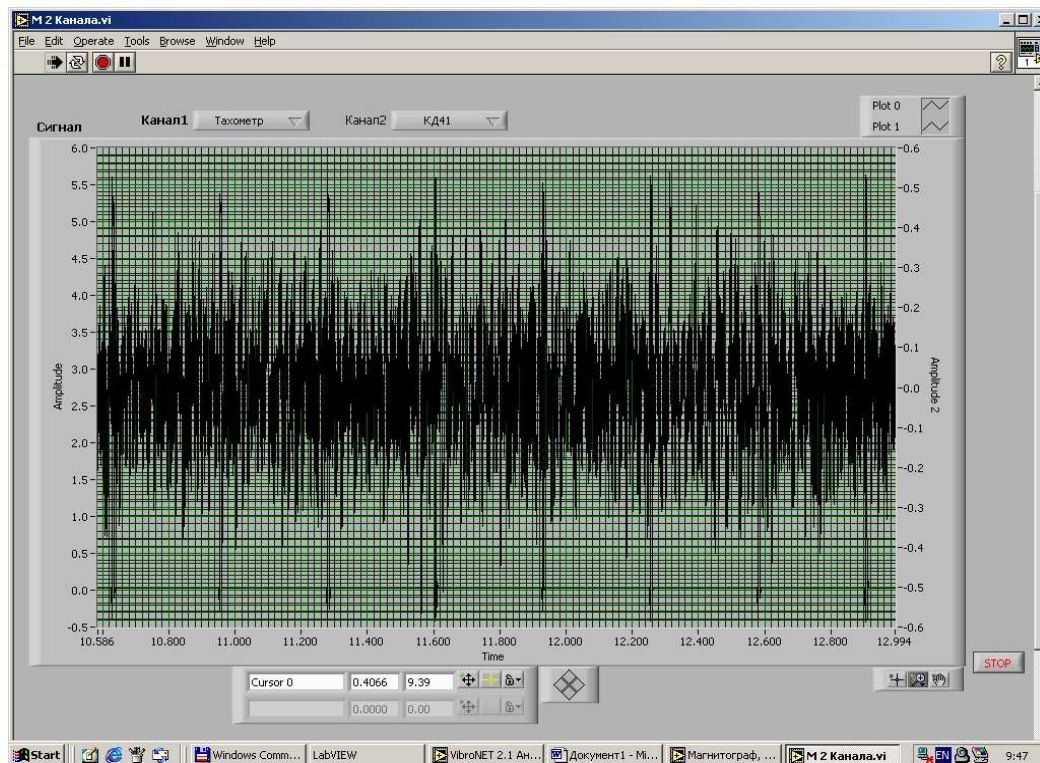


Рис. 2 Осциллограмма кондиционного подшипника. Режим 1

Вместе с тем в спектрах сигналов отчетливо наблюдаются составляющие с частотами BSF, BPFO, и их гармониками, рис. 3 и 4.

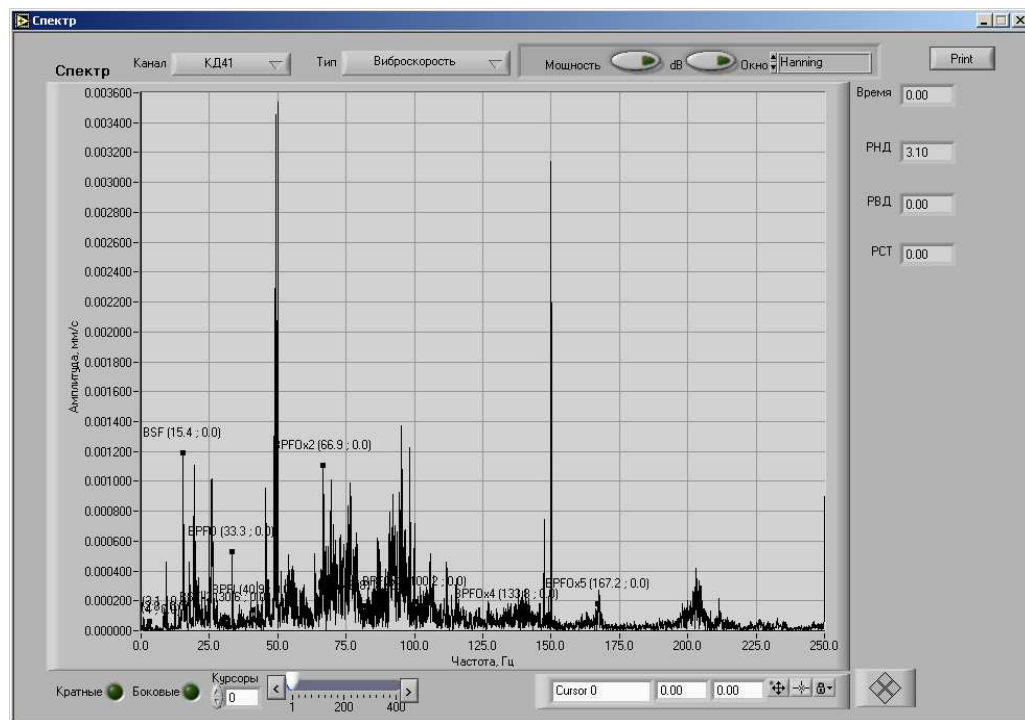


Рис.3. Спектр сигнала кондиционного подшипника. Режим 1

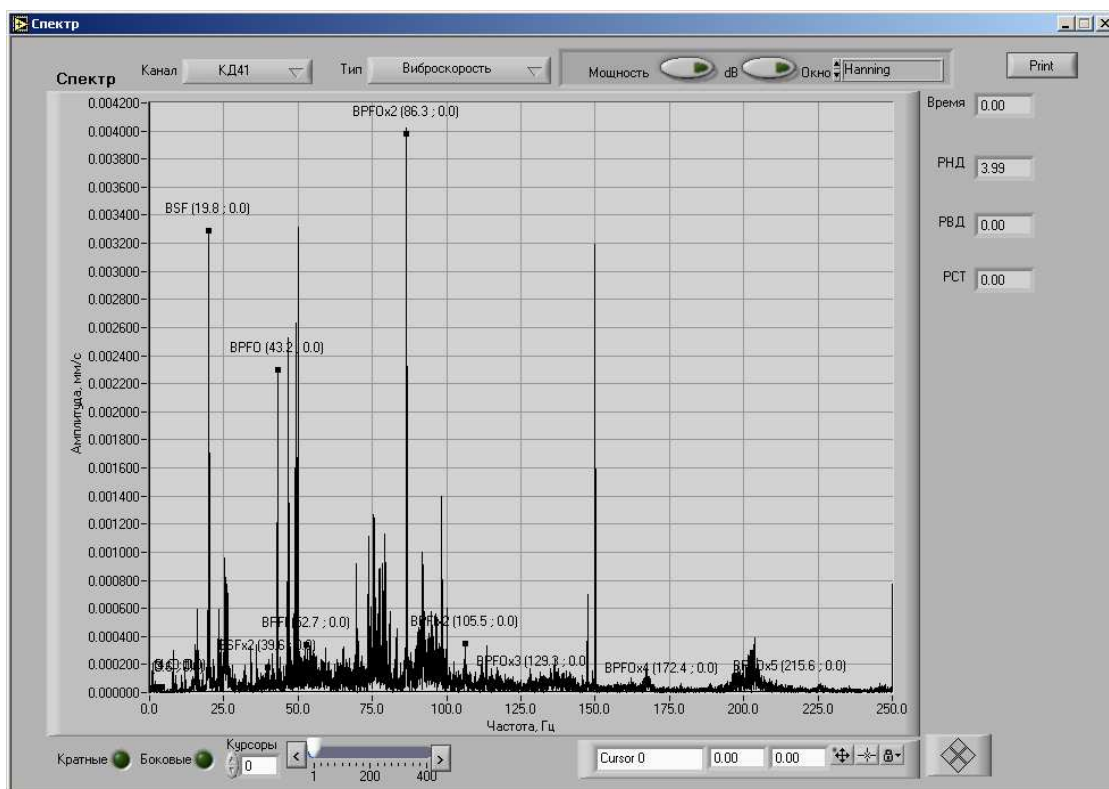


Рис. 4. Спектр сигнала кондиционного подшипника. Режим 2

Амплитуда на частоте 2 BPFO выше, чем на частоте BPFO. Следует также отметить, что частота BSF совпадает с 5-й гармоникой частоты вращения ротора и поэтому выделяется сильнее других подшипниковых частот.

Вибрационные сигналы от подшипника с поврежденными роликами

Лыска по всей длине ролика

На рис. 5 приведена осциллограмма вибрационного сигнала при этом повреждении. Как и ожидалось сигнал, создаваемый повреждением подшипника, представляет собой периодическую последовательность пачки из нескольких импульсов. Максимальные амплитуды сигнала на осциллограммах составили 0.4 g...0.8 g на режиме 1 и 1.0 g...1.8g на режиме 2. Интервал между соседними импульсами равен $1/2BSF$. Интервал повторения пачки – один оборот сепаратора, т.е. $1/FTF$. Число импульсов в пачке - 6 (иногда 7).

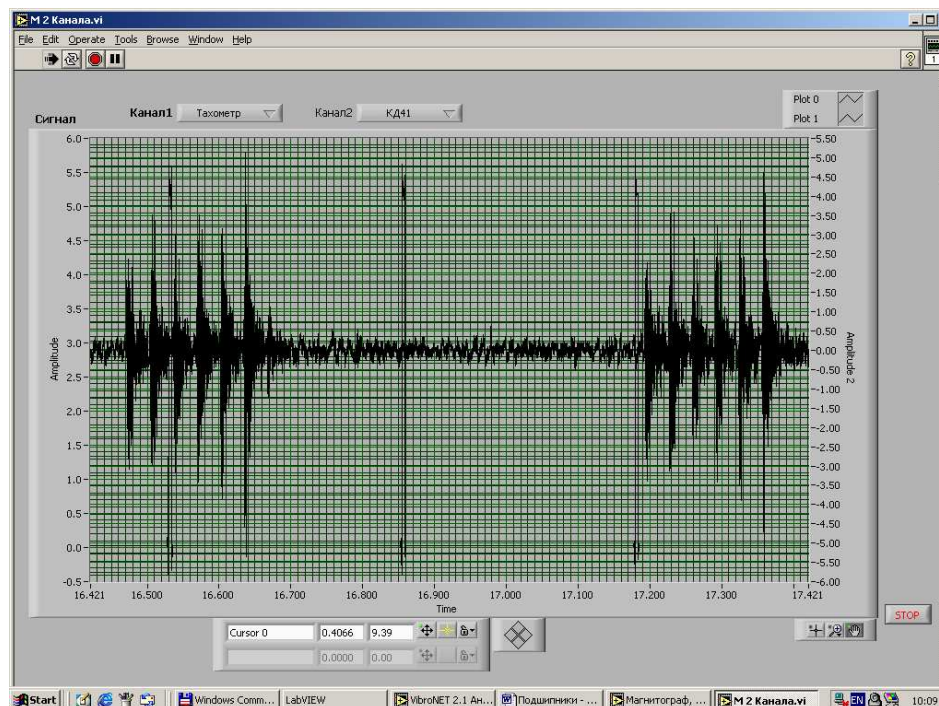


Рис. 5. Осциллограмма сигнала подшипника с повреждением “Лыска по всей длине ролика”

Режим 1. Интервал между метками датчика частоты вращения равен одному обороту ротора

В интервале между импульсами наблюдаются несколько (12-15) затухающих колебаний с частотой около 1000 Гц, что хорошо видно на “растянутой” осциллограмме, рис. 6. Эти колебания полностью затухают до следующего появления импульса. Такая картина характерна для отклика на удар динамической системы со сравнительно слабым демпфированием, когда длительность удара значительно меньше периода собственных колебаний системы, а частота ударов мала.

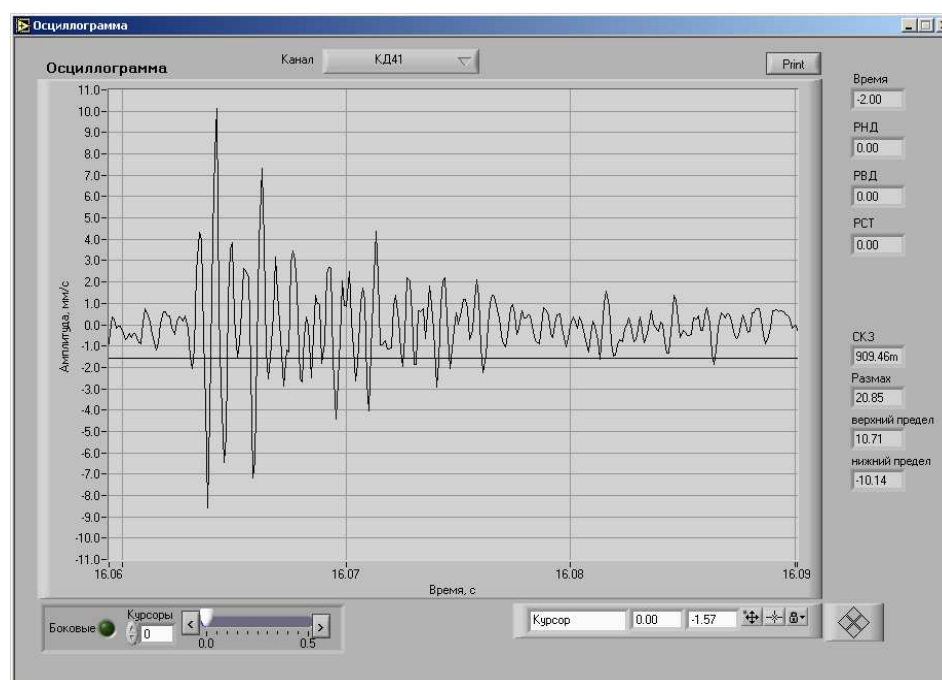


Рис. 6. Растянутая осциллограмма сигнала отклика на удар на рисунке 5

На рис. 7 приведена спектрограмма вибрационного сигнала от подшипника с поврежденным роликом для режима 2.

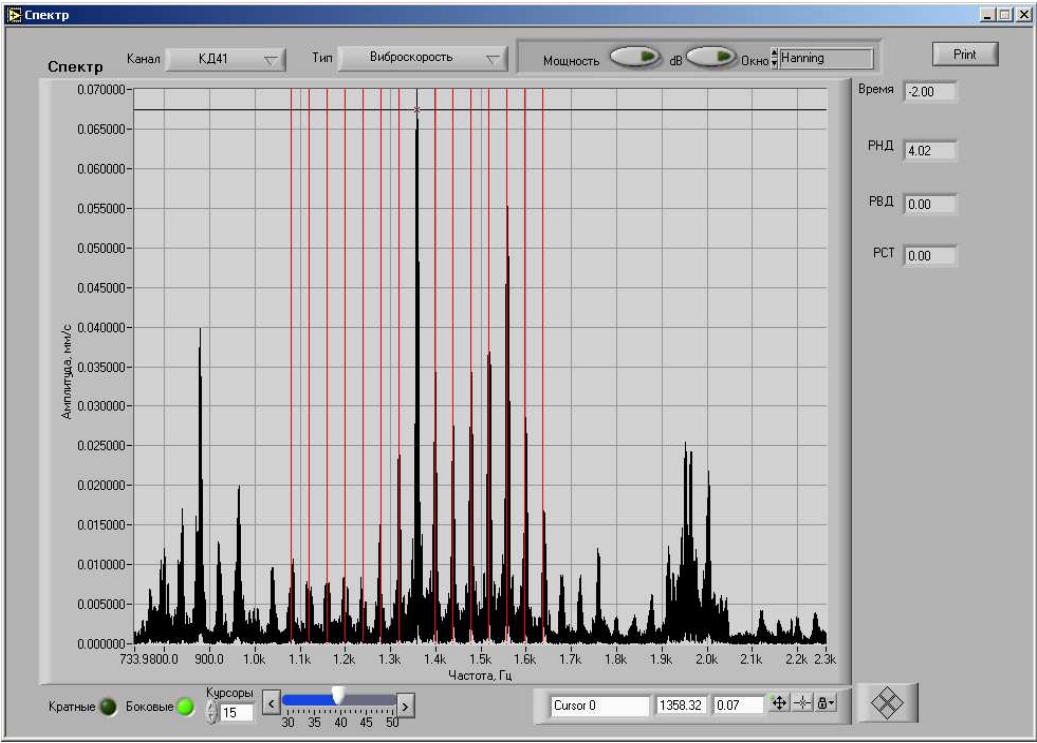


Рис. 6. Спектрограмма виброскорости. Режим 2. Выделены боковые гармоники с шагом ~ 39 Гц (2BSF)

Амплитуды основных резонансных составляющих спектра приведены в таблице 4.

Таблица 4

Частота, Гц	Виброскорость, мм/сек	
	Режим 1	Режим 2
875	0,018	0,04
1350	0,024	0,065

В таблице 5 приведены результаты измерений на низких частотах.

Таблица 5

Режим	Виброскорость, мм/сек							
	f _{рот}	FTF	BSF+ 5f _{рот}	2BSF	BPFO	2BPFO	BPFI	50 Гц
1	0,038	0,02	0,12	-	0,006	-	-	0,04
2	0,07	0,1	0,04	-	0,014	-	0,01	0,03
Примечание			Присутствуют составляющие ± FTF					

Риска по всей длине ролика. Осциллограммы и спектры при данном повреждении аналогичны осциллограммам и спектрам при повреждении “Лыска по всей длине ролика”.

Три укола + один укол. При этом повреждении амплитуда основной резонансной составляющей спектра на частотах 1250-1280 Гц составила 0.0012 мм/сек на режиме 1 и 0.0013 мм/сек - на режиме 2, рис. 7.

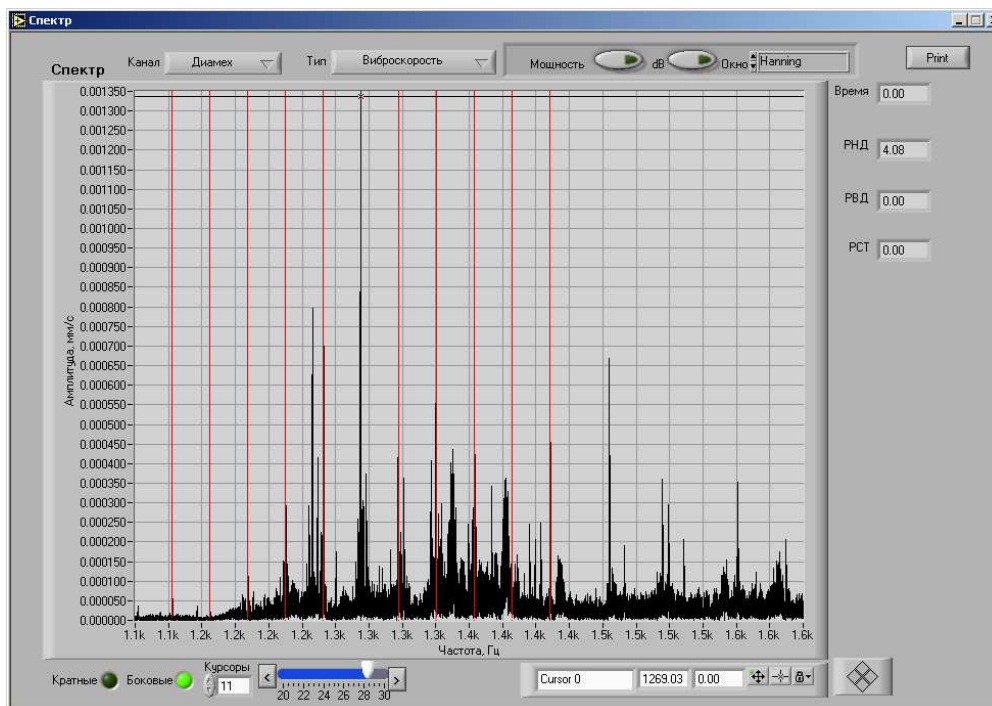


Рис. 7. Спектрограмма виброскорости. Режим 2.
Выделены боковые гармоники с шагом 28Гц

В спектре в зоне резонанса проявляются боковые комбинационные спектральные составляющие с интервалом по частоте, изменяющимся пропорционально частоте вращения ротора (таблица 8). При этом отношение $\Delta f/2BSF$ примерно равно отношению углов слева и справа между зонами расположения повреждений на окружности ролика $145^\circ / 215^\circ = 0,67$.

Таблица 8

	Режим 1	Режим 2
Интервал по частоте между спектральными составляющими Δf , Гц	20,5	28
$\Delta f/2BSF$	0,68	0,7
$\Delta f/FTF$	15,5	17,5
$\Delta f/f_{рот}$	6,83	7

Это указывает на то, что по интервалу между боковыми комбинационными составляющими спектра в высокочастотных резонансных зонах можно судить о взаимном окружном положении повреждений на поверхности ролика.

Другие повреждения

Сигналы при повреждениях “Короткая лыска на части длины ролика” и “Короткая риска на части длины ролика” по характеру осциллограмм и спектру практически не отличаются от сигнала исправного подшипника. Это связано не только с их значительно меньшей виброактивностью по сравнению с повреждениями “Лыска по всей длине ролика” и “Риска по всей длине ролика”, но также с бочкообразным износом ролика. Уменьшение диаметра ролика составляет 20 мкм и более, что превышает максимальную контактную деформацию ролика и колец. Поэтому значительная часть протяженности повреждения не участвует в контакте.

Сигналы при повреждении “Один укол” по характеру осциллограмм и спектру также практически не отличаются от сигнала исправного подшипника. Это связано с очень малой вибрационной активностью повреждения в виде одиночной вмятины без выпучивания материала..

Следует также отметить, что низкочастотные спектры (на частотах FTF, BSF, BPFO, BPFI и их гармониках) при всех повреждениях ролика практически не отличались от спектров кондиционного подшипника.

В целом по результатам анализа спектров можно заключить, что спектральный анализ вибросигнала в зоне сравнительно высокочастотных информативных резонансов конструкции является информативным для оценки размеров и положения повреждений ролика в виде весьма протяженных лысок и рисков, а также вмятин с выпучиванием материала.

Применение полосовой фильтрации

Диапазон частот от 1.0 кГц до 1.5 кГц является основной резонансной зоной, которая проявляется только при ударах в подшипнике. Была проведена полосовая фильтрация и сравнение полученных значений виброускорений в этом диапазоне для исправного подшипника и подшипников с различными повреждениями. Результаты сравнения полученных значений представлены на рис. 8. Наглядно видно, что:

- имеет место значительная разница между сигналами исправного подшипника и подшипника с повреждениями “Длинная лыска на части длины ролика”, “Длинная риска на части длины ролика” и “Три укола + один укол”;
- разница между сигналами исправного подшипника и подшипника с повреждениями “Короткая лыска на части длины ролика”, “Короткая риска на части длины ролика” и “Один укол” незначительна;
- повышение частоты вращения ротора усиливает разницу в сигналах от исправного подшипника и подшипника с поврежденным роликом.

По результатам полосовой фильтрации можно заключить, что такая фильтрация вибросигнала может быть эффективна в зоне сравнительно высокочастотных информативных резонансов конструкции для оценки размеров повреждений ролика в виде весьма протяженных лысок и рисков, а также вмятин с выпучиванием материала.

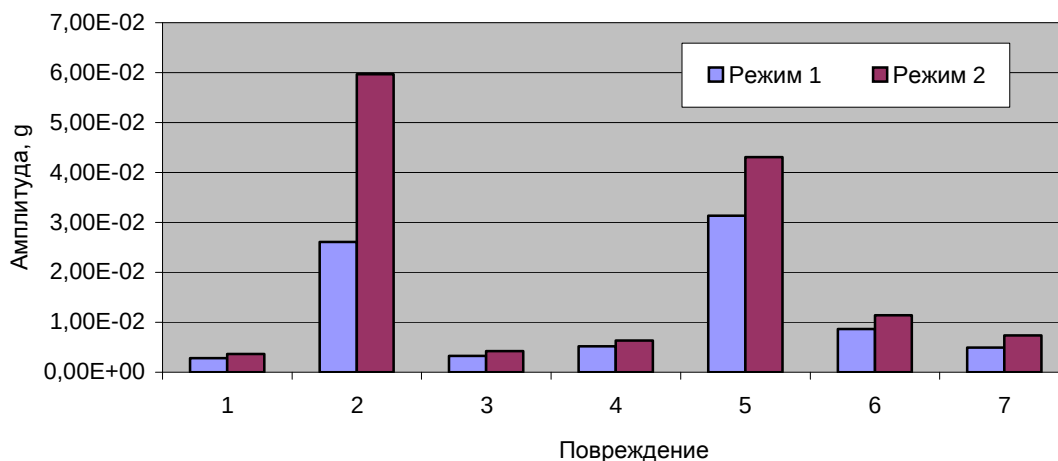
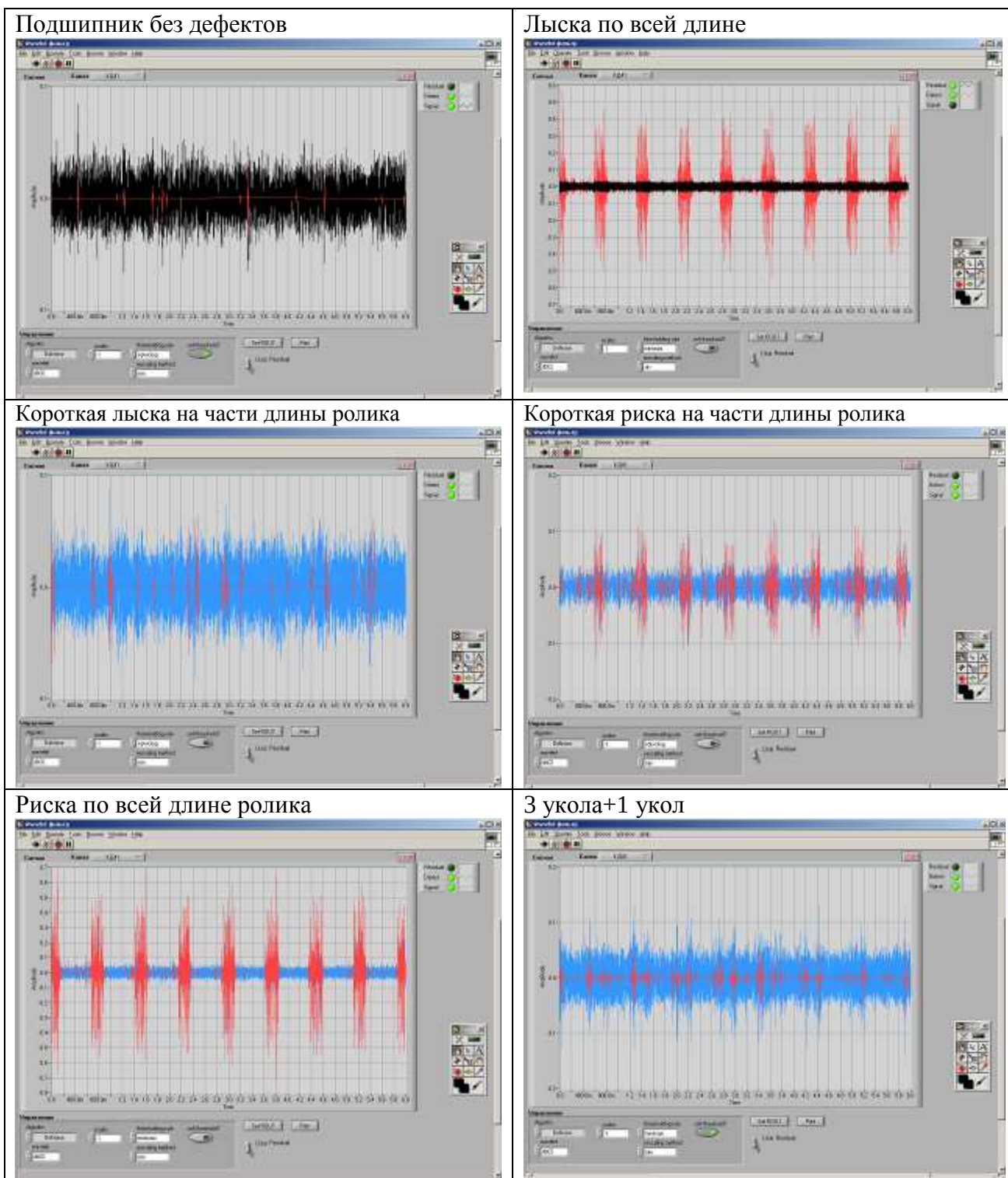


Рис. 8. Амплитуды виброускорений в полосе частот от 1.0 кГц до 1.5 кГц
 1- кондиционный подшипник; 2- лыска по всей длине ролика; 3- короткая лыска на части длины ролика; 4- короткая риска на части длины ролика; 5- риска по всей длине ролика; 6- три укола + один укол; 7- один укол

Вэйвлет-анализ

Для выделения импульсных составляющих в сигналах с сильной шумовой помехой эффективен метод вэйвлет-анализа [2]. Как и ожидалось, вэйвлет-анализ оказался полезным для обнаружения ударов от весьма слабых повреждений подшипника, например, коротких рисок или небольших вмятин. В таблице 9 приведены результаты обработки сигнала, полученного при испытании подшипника с различными повреждениями. Согласно рекомендациям работы [3] применено вейвлет-преобразование с использованием функций Добеши типа “db02”. Параметры вэйвлета оптимизировали автоматически. Импульсные составляющие вибросигналов, выделенные в результате вэйвлет-фильтрации, показаны красным цветом. Черным и голубым цветом показана шумовая составляющая сигнала. Можно видеть, что число и амплитуда импульсов сигнала, оставшегося после вейвлет преобразований, даже в случае слабых повреждений ролика, значительно больше, чем в случае кондиционного подшипника.



Выводы

Показано и экспериментально подтверждено, что методом вибродиагностики можно обнаружить локальные повреждения роликов, возможные при монтаже и сборке подшипника в составе ротора, и имеющие характер лысок, рисок, а также вмятин (уколов).

Показано, что разнообразные диагностические признаки локальных повреждений ролика содержатся в осциллограмме и спектре сигнала акселерометра, получаемого при медленном вращении ротора.

Признаки повреждений могут быть выделены полосовой фильтрацией сигнала в диапазоне информативных резонансов. Наилучший результат выделения сигнала от повреждения ролика дает вейвлет-фильтрация, позволяющая получить признаки даже для очень слабых повреждений роликов подшипника. Можно заключить, что для обнаружения и оценки повреждений подшипника полезна комплексная обработка сигнала по рассмотренным алгоритмам.

Литература

1. Кульчихин В.Г., Шабает В.М., Гаранин И.В., Леонтьев М.К., Потапова О.Ю. Стендовые испытания приводов ГПА в условиях ремонтного предприятия. Монография. Тюмень: ОАО "Тюменские авиастроители", 2006. стр.160
2. Неразрушающий контроль. Справочное издание под ред. В.В. Клюева, том 7, книга 2 «Вибродиагностика» М., Машиностроение, 2005, стр. 828
3. Кузеев И.Р., Закирничная М.М., Корнишин Д.В., Пономарев М.В. Определение технического состояния насосных агрегатов с применением вейвлет-анализа. ОАО "Издательство "Машиностроение". Журнал "Контроль. Диагностика", №06 2004

Название статьи

Вибродиагностика повреждений подшипников качения при монтаже и сборке тяжелых роторных узлов

Фамилии, имена и отчества авторов

Шабает Вячеслав Михайлович, Shabaev V.M, к.т.н., главный инженер

Казанцев Андрей Сергеевич, Kazantsev A.S. заместитель главного инженера

Леонтьев Михаил Константинович, Leontiev M.K., д.т.н., профессор

Гаранин Игорь Васильевич, Garanin I.V. д.т.н., профессор

Карасев Виктор Афанасьевич, Karasev V.A., к.т.н., ведущий научный сотрудник

Контактные адреса**Карасев Виктор Афанасьевич**

125368, Москва, Митинская ул., д.47, кор. 2, кв 178.

Факс: (495)362-22-73

Телефон домашний: (495) 753-05-91

Электронная почта: karasev.va@mail.ru

Леонтьев Михаил Константинович

Адрес: Россия, 141400, Московская обл. г. Химки, ул. Ленинградская 7, кв.26

Телефон мобильный (495) 768-71-29

Факс: (495)232-60-91

Телефон домашний: (495) 573-66-14

Электронная почта: lemk@alfatran.com