

## **ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ НИЗКООБОРОТНЫХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В БУКСАХ МЕХАНИЗМА ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МОСТОВЫХ КРАНОВ**

### **Введение**

Основные задачи по диагностике подшипников качения в процессе их эксплуатации решаются, как правило, одним из трех способов. Первый способ использует алгоритмы обнаружения дефектов по росту температуры подшипникового узла во время эксплуатации, второй - по появлению в смазке продуктов износа подшипника, а третий - по изменению уровня и свойств вибрации (шума). Наиболее полную и детальную диагностику подшипников с обнаружением и идентификацией дефектов на ранней стадии развития можно выполнить по сигналу вибрации подшипника, в основном, высокочастотной. Основные проблемы такой диагностики возникают в двух случаях, когда высокочастотная вибрация слишком слаба, т.е. в низкооборотных механизмах грузоподъемных машин, и когда корпус подшипникового узла недоступен для измерения высокочастотной вибрации. Способ диагностики низкооборотных подшипников качения грузоподъемных машин приводится в настоящей публикации.

### **Основные проблемы**

Дефекты подшипников качения появляются на трех основных этапах жизненного цикла - в процессе изготовления, при установке в подшипниковый узел и во время эксплуатации.

#### **1. Дефекты изготовления:**

- ✓ трещины, сколы и раковины в деталях подшипника;
- ✓ отклонения от правильных геометрических форм деталей подшипника;

## 2. Дефекты установки:

- ✓ перекосы, колец у подшипников вследствие неправильной установки;
- ✓ трещины, сколы и другие повреждения при запресовке подшипников.

## 3. Дефекты эксплуатации:

- ✓ коррозионный износ, как следствие воздействия окружающей среды;
- ✓ абразивный износ, как следствие загрязнения смазки;
- ✓ выкрашивание поверхностей качения под воздействием действующей нагрузки.

К последнему этапу можно отнести и транспортировку машины до места установки, и монтаж ее на рабочем месте. Типовые дефекты изготовления, к которым относятся плавные отклонения формы поверхностей качения от расчетной, лучше всего обнаруживать во время выходного контроля, при прокручивании на специальном стенде, по низкочастотной вибрации опор последнего. Естественно, что частота вращения подшипника в этом случае должна быть достаточно большой, выше 3-5 Гц, чтобы не возникли сложности при измерении низкочастотной вибрации. Для обнаружения скрытых дефектов изготовления, таких как трещины и т.д., приводящих к появлению ударных импульсов, можно использовать измерения высокочастотного шума подшипника в ближней зоне излучения. Таким образом, при выходном контроле подшипников можно избежать проблем, появляющихся при диагностике низкооборотных подшипников. Типовые дефекты монтажа подшипников, приводящие к значительному увеличению локальных нагрузок на поверхности качения и снижению толщины масляной пленки в точках приложения этих нагрузок, чаще всего обнаруживаются по росту среднечастотной вибрации подшипникового узла. В подшипниках низкооборотных машин составляющие вибрации, по которым обнаруживаются дефекты монтажа,

попадают уже в область низких частот. Соответственно возникают проблемы разделения подшипниковых составляющих вибрации с вибрацией, дошедшей до точки контроля от других узлов машины или даже от других машин. Кроме того, возникают проблемы, связанные с низким уровнем подшипниковой вибрации, амплитуда которой, в первом приближении, пропорциональна квадрату частоты вращения подшипника, а также задачи частотного разделения составляющих подшипниковой вибрации, которые могут различаться лишь на величину, равную частоте вращения сепаратора. Решение этих задач возможно лишь при использовании измерительной аппаратуры с большим динамическим диапазоном и высоким разрешением по частоте в режиме измерения с возможностью значительного масштабирования и детального изучения спектрального анализа.

Дефекты, возникающие в подшипниках качения во время эксплуатации, в первую очередь изменяют свойства сил трения, поэтому на ранней стадии развития обнаруживаются лишь по высокочастотной случайной вибрации, возбуждаемой силами трения. Ударные импульсы, возникающие при контакте поверхностей качения с многими видами дефектов, можно рассматривать как одну из составляющих сил трения, также обнаруживаемую по высокочастотной вибрации. Лишь после того, как дефекты становятся аварийноопасными, их влияние на низкочастотную вибрацию машины в целом оказывается достаточным, чтобы обнаружить дефект с большой степенью достоверности. При диагностике подшипников грузоподъемных машин в процессе ее эксплуатации возникает ряд проблем, требующих усложнения методов обнаружения дефектов и роста технических возможностей измерительной и анализирующей аппаратуры. Это связано с низким уровнем высокочастотной вибрации подшипников грузоподъемных механизмов, а, при диагностике по низкочастотной вибрации, еще и с высоким уровнем вибрации, распространяющейся в точки контроля от других узлов механизмов и оборудования, установленных на одной площадке. Поскольку с уменьшением скорости вращения механизма

вибрация на высоких частотах падает гораздо быстрее, чем на средних и низких частотах, для диагностики подшипников по высокочастотной вибрации, возбуждаемой силами трения, необходимо увеличивать не только чувствительность измерительной аппаратуры, но и такие ее параметры, как динамический диапазон и линейность. Лишь в этом случае выделяемые из сигнала высокочастотные составляющие превышают собственные шумы измерительных приборов и шумы, вносимые за счет нелинейных искажений низкочастотных и среднечастотных составляющих, часто превышающих уровень высокочастотных составляющих в 1000 и более раз. Кроме того для диагностики подшипников качения по среднечастотной вибрации при слишком слабом уровне высокочастотной, как и при монтаже подшипника, необходимо иметь приборы с высоким разрешением по частоте.

### **Анализ существующих методов диагностики**

Обнаружение зарождающихся дефектов подшипников качения, в основном, производится двумя методами - по появлению ударных импульсов и по модуляции сил трения. В низкооборотных подшипниках толщина масляного слоя ниже, чем в высокооборотных, а следовательно, разрывы масляной пленки и ударные импульсы возникают гораздо чаще. Величина ударных импульсов в низкооборотных подшипниках гораздо ниже, но их число гораздо больше, и они накладываются друг на друга[3,4]. Практически таким образом идет процесс формирования сил “сухого” трения качения и, даже если удастся выделить высокочастотную вибрацию подшипника, имеющего естественный износ, обнаружить в нем компоненты, возбуждаемые ударными импульсами, крайне сложно. Это означает, что метод ударных импульсов для диагностики низкооборотных подшипников применим лишь в частных случаях и совершенно неприемлем для диагностики подшипников качения грузоподъемных машин из-за особенности их работы.

Механизм амплитуды модуляции сил трения в подшипниках качения с дефектами одинаков как у высокооборотных машин, так и у низкооборотных. И это несмотря на то, что в высокооборотных подшипниках трение имеет гидродинамическое происхождение, а в большинстве низкооборотных - механическое или, по крайней мере, комбинированное. Поэтому метод спектрального анализа колебаний мощности случайной вибрации, одинаково успешно может применяться для диагностики и высокооборотных, и низкооборотных подшипников качения.

Проблемы при диагностике подшипников качения во многом связаны со сложностями измерения высокочастотных составляющих вибрации. В высокооборотных подшипниках они связаны в первую очередь с потерями при распространении высокочастотной вибрации и решаются путем установки датчика вибрации на элементы подшипникового узла, имеющие непосредственный контакт с неподвижным кольцом подшипника. В низкооборотных подшипниках соотношение уровней низкочастотной (среднечастотной) и высокочастотной вибрации гораздо хуже, чем в высокооборотных, и поэтому возникают дополнительные проблемы разделения высокочастотной и низкочастотной вибрации, а также выделения высокочастотных составляющих сигнала на фоне собственных шумов аппаратуры.

В тех случаях, когда подшипники вращаются с часто изменяемой скоростью, можно выделить 3 основных метода в диагностировании подшипников по результатам вибрации[4]:

- Первый метод, который обычно и является основным, состоит в поэтапном накоплении результатов спектрального анализа. При этом подходе считается, что всегда можно выбрать отрезок времени, за который подшипник три - четыре оборота вращается со стабильной скоростью. За это время и измеряется спектр, который затем усредняется с результатами аналогичных измерений в другие отрезки времени.

- Второй метод заключается в организации специальных диагностических режимов работы машины с постоянной скоростью вращения, например на холостом ходу. В качестве примера можно привести диагностику подшипников при прокрутке его внешним приводом. Например - диагностика буксовых подшипников электропоездов и локомотивов с подъемом каждой из тележек с колесными парами на домкратах и последующим вращением колесных пар от тяговых двигателей, а также вывешивание при помощи домкратов приводных тележек механизмов передвижения грузоподъемных машин. Проблемы такой диагностики определяются тем, что нагрузка на подшипники может изменить направление и дефектный участок неподвижного кольца подшипника, при наличии в подшипнике зазора, не входит в контакт с телами качения. Результатом может стать пропуск дефекта неподвижного кольца подшипника. Может возникнуть и другая ситуация, когда в новое место передачи нагрузки на неподвижное кольцо совпадает с точкой, в которой при типовых условиях работы скапливаются отходы смазки. Тогда при диагностике в первые минуты вращения колеса, может появиться ложная информация о дефекте. В таких случаях необходимо проводить приработку подшипника до диагностики. Данный метод весьма трудоемок и требует выведения диагностируемой машины из цикла эксплуатации. Необходимо отметить, что диагностика подшипников качения, установленных на холостых тележках, весьма трудоемка и требует дополнительного оборудования.
- Третий метод диагностики подшипников при непрерывно изменяющейся частоте вращения - синхронный анализ спектров вибрации с использованием датчиков угла поворота вала с диагностируемым подшипником. Как показывает практика, при таком подходе удается диагностировать даже подшипники, работающие в качающихся механизмах, в частности, подшипники конверторов в

металлургии. Но и при этом подходе существует ряд трудностей, если скорость вращения в момент измерений изменяется на величину более 15 - 20%.

Для диагностики подшипников грузоподъемных машин более всего подходит первый метод, который позволяет проводить диагностику непосредственно на работающей машине с имитацией рабочих нагрузок. Для реализации данного метода необходимо использовать оборудование, которое позволяет регистрировать и анализировать частотные характеристики вибрации в подшипниках с высокой точностью и возможностью отсеивания (фильтрации) внешних шумов.

### **Оборудование для проведения эксперимента**

Экспериментальные исследования проводились на механизме передвижения мостового крана. Особенности работы опорных подшипников механизма передвижения заключаются в следующем:

- скорость вращения опорных подшипников составляет не более 1 об/с.;
- большую часть рабочего времени механизм передвижения мостового крана находится в режиме ускорения или торможения;
- нагрузка, которую испытывает опорный подшипник качения механизма перемещения, является переменной, так как на нее влияет и прохождение колеса через стыки рельсов подкранового пути, и контакт реборд ходовых колес крана с рельсами;
- время установившегося режима работы, при котором предоставляется возможность наиболее качественно провести вибродиагностическое исследование подшипника, ограничено 2-5 оборотами ходового колеса в зависимости от качества подкранового пути.

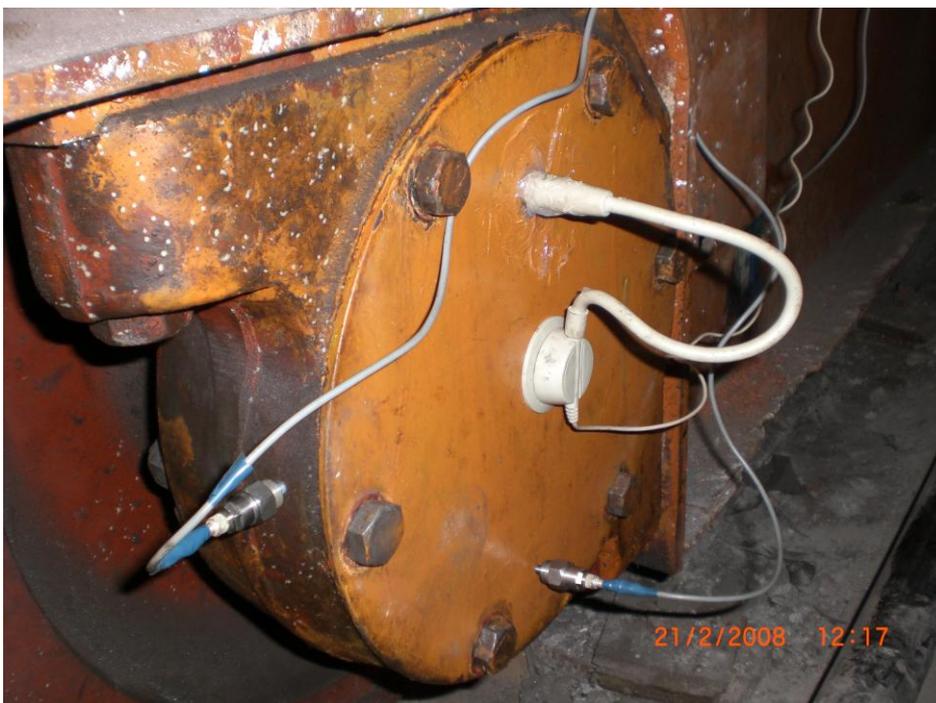
С учетом всех этих особенностей необходимо подобрать оборудование, которое может регистрировать вибрацию подшипников на протяжении продолжительного периода работы с возможностью последующего просмотра записанного сигнала и выбора для анализа участков, при которых подшипники вращаются в установившихся режимах работы.

Для регистрации вибрации в подшипниках нами были выбраны 2 типа датчиков с возможностью последующего сравнения полученных результатов.

Первый способ регистрации был выбран при помощи вибродатчиков Д 14 с последующим усилением с помощью двухкаскадного усилителя и трансляции сигнала на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) компьютера. В качестве АЦП была использована звуковая плата компьютера, которая позволяет как преобразовывать аналоговый сигнал в цифровой, так и цифровой в аналоговый. Выбор использования АЦП звуковой платы наиболее рационален, так как таким устройством оборудованы все современные компьютеры включая переносные, а так же разрядность данного АЦП вполне удовлетворяет условиям точности измерения сигнала.

При использовании второго способа для регистрации шумов подшипника был выбран пьезоэлектрический микрофон, сигнал которого так же обрабатывался при помощи АЦП компьютера. Для локализации внешних шумов, которые могли бы влиять на качество записанного сигнала, он устанавливается непосредственно в буксе подшипника и изолируется силиконом.

Установка датчиков для регистрации шума и вибрации подшипника ходового колеса мостового крана приведена на рисунке 1.



**Рис. 1** - Установка датчиков регистрации шума и вибрации на буксу ходового колеса мостового крана.

Для регистрации и первичной обработки результатов эксперимента был выбран компьютер, собранный на платформе Intel Celeron с частотой процессора - 800МГц., со встроенной звуковой платой на материнской плате с чипсетом INTEL 810. В комплект измерительной и регистрирующей аппаратуры входил собранный автором двухкаскадный усилитель низкой частоты с возможностью усиления сигнала на входе от 5 мВ, на выходе до 10 вольт. Так же для настройки усилителя был использован генератор низкой частоты и цифровой мультиметр. Фото аппаратуры установленное непосредственно на смотровой тележке мостового крана представлено на рисунке 2.



**Рис. 2** - Установка измерительной аппаратуре на мостовом кране.

В качестве программы для регистрации сигнала была выбрана программа PowerGraph 2.1, которая позволяет не только отображать сигнал в режиме реального времени с возможностью масштабирования, но и позволяет производить отцифровку сигнала с возможностью дальнейшей обработки результатов в различных стандартных приложениях. Так же программа PowerGraph 2.1, позволяет производить запись сигнала, длина записи ограничена только аппаратными возможностями компьютера, и объемом жесткого диска.

### **Экспериментальные результаты**

В настоящее время авторами накоплен значительный практический опыт диагностирования низкооборотных подшипников, которые установлены в механизмах передвижения мостовых кранов. Как правило, основной проблемой при диагностировании оказывалось ограниченное время вращения подшипника со стабильными нагрузкой и частотой вращения.

Для достаточно полной диагностики подшипникового узла при помощи спектрального анализа частоты вибрации необходимо измерять вибрацию за время порядка 5 -10 оборотов подшипника. В таких отраслях промышленности, как энергетика, бумажная промышленность и другие, где машины вращаются со стабильной частотой длительное время, никаких специальных режимов работы подшипника или измерительной системы предусматривать нет необходимости. Особенности диагностики подшипников низкооборотных машин в этих отраслях заключаются лишь в определении полосы частот сигнала вибрации, используемого для проведения спектрального анализа, и расширении списка диагностических признаков дефектов тел качения.

Важнейшими критериями качества диагностики подшипников качения, в том числе и низкооборотных, являются вероятности пропуска сильного дефекта подшипника, ложного обнаружения дефекта и правильности определения вида дефекта. Если первые два показателя определяют эффективность диагностирования, то последний - эффективность долгосрочного прогноза, длительность которого напрямую связана как с глубиной, так и с видом развивающихся дефектов.

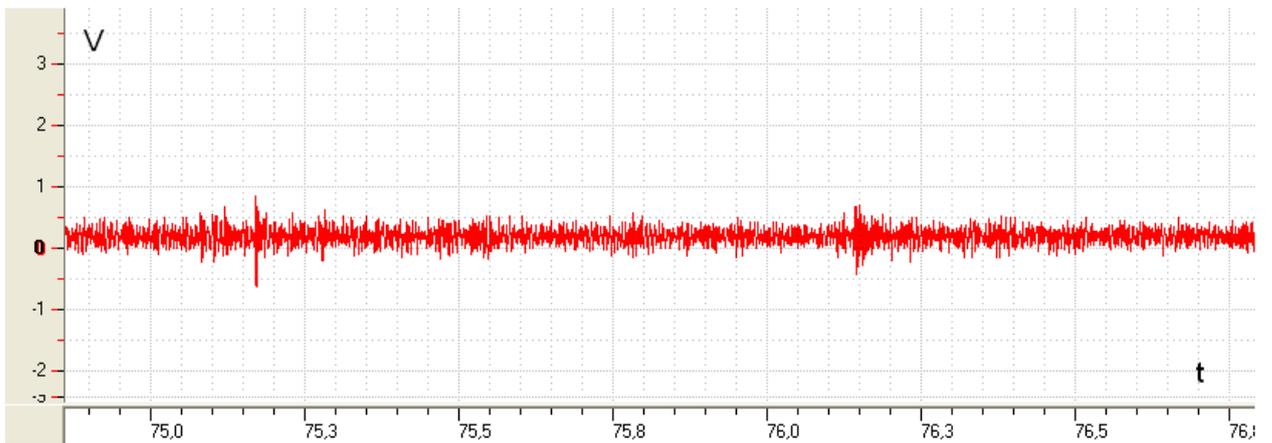
Наиболее высокие показатели, составляющие менее трех процентов для суммы вероятностей пропуска сильного дефекта и ложной тревоги, достигаются при периодическом измерении спектра вибрации. При интервалах между измерениями порядка 10% от ожидаемого ресурса подшипника обеспечивается и долгосрочный прогноз безаварийной работы, и, после того, как в подшипнике появятся развитые дефекты, прогноз остаточного ресурса. Последний целесообразно производить по трендам, характеризующим рост спектральных составляющих вибрации на низких и, особенно, на средних частотах.

Высокие показатели достигаются и при диагностике подшипников по одному измерению спектров вибрации с последующим сравнением результатов с данными измерений одинаковых параметров вибрации группы

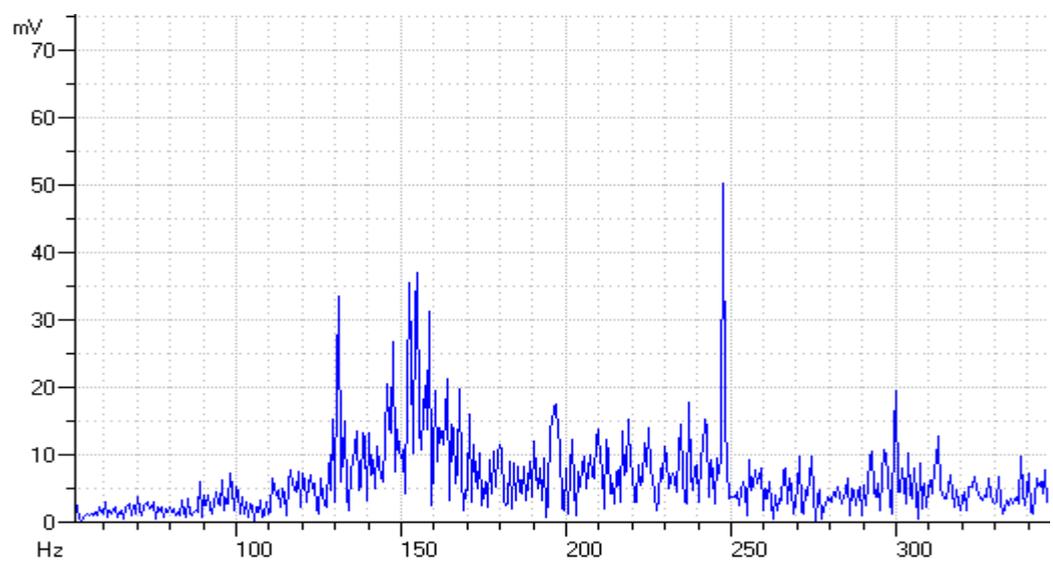
подшипниковых узлов идентичных машин (диагностика по множеству). При таком подходе снижается, в основном, достоверность прогноза остаточного ресурса подшипника при наличии сильных дефектов, но практически сохраняется достоверность диагноза и прогноза состояния подшипника при отсутствии развитых дефектов.

Следующее направление диагностики подшипников низкооборотных машин по однократным измерениям только спектра имеет меньшую достоверность, чем перечисленные выше, но и оно оказывается эффективным более, чем в 90% практических задач. При единственном измерении спектра вибрации можно совершить две ошибки, а именно, не идентифицировать дефекты смазки, приводящие к росту сил трения и высокочастотной вибрации или не разделить группы развитых дефектов в подшипнике, находящемся в предаварийном состоянии, когда из-за отсутствия периодичности вращения тел качения силы трения перестают быть периодически модулированными. Но в обоих перечисленных случаях дефектный подшипник выявляется по повышенной вибрации (шуму) или температуре. Авторами использовался метод сравнения уровня шума и вибрации для нормального и заведомо изношенного подшипников, которые были установлены в буксах холостых колес механизма передвижения мостового крана.

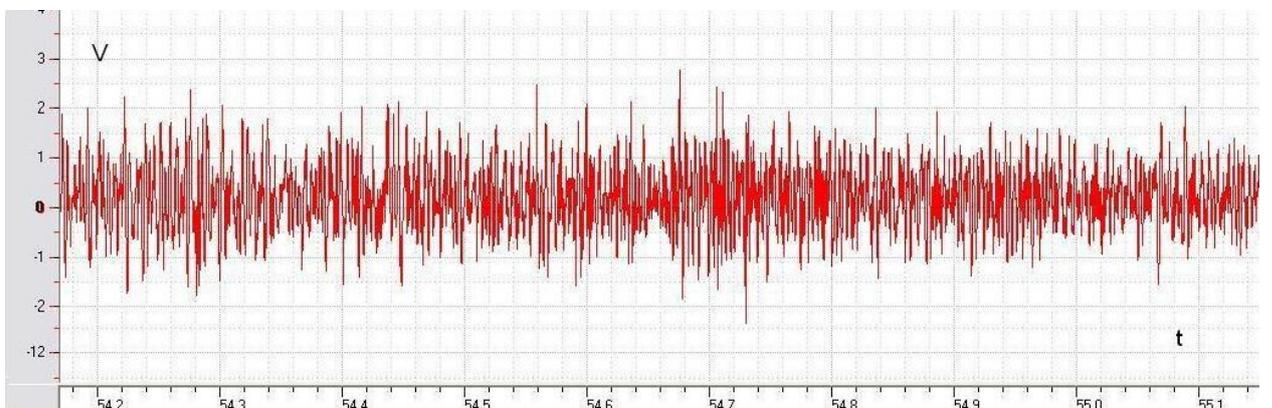
Сущность метода иллюстрируется рисунком 3, на котором показаны сигналы высокочастотной вибрации подшипника качения без дефектов и с дефектами, а также спектральный анализ этих сигналов. В бездефектном подшипнике мощность сигнала не имеет периодических низкочастотных колебаний, а в дефектном эти колебания достаточно сильны и хорошо выделяются в спектре огибающей в виде гармонических составляющих, имеющих подшипниковые частоты или их комбинации. Вид дефекта определяется частотами обнаруживаемых составляющих, величина дефекта - глубиной модуляции мощности вибрации, то есть соотношением амплитуд гармонических и случайных составляющих [6].



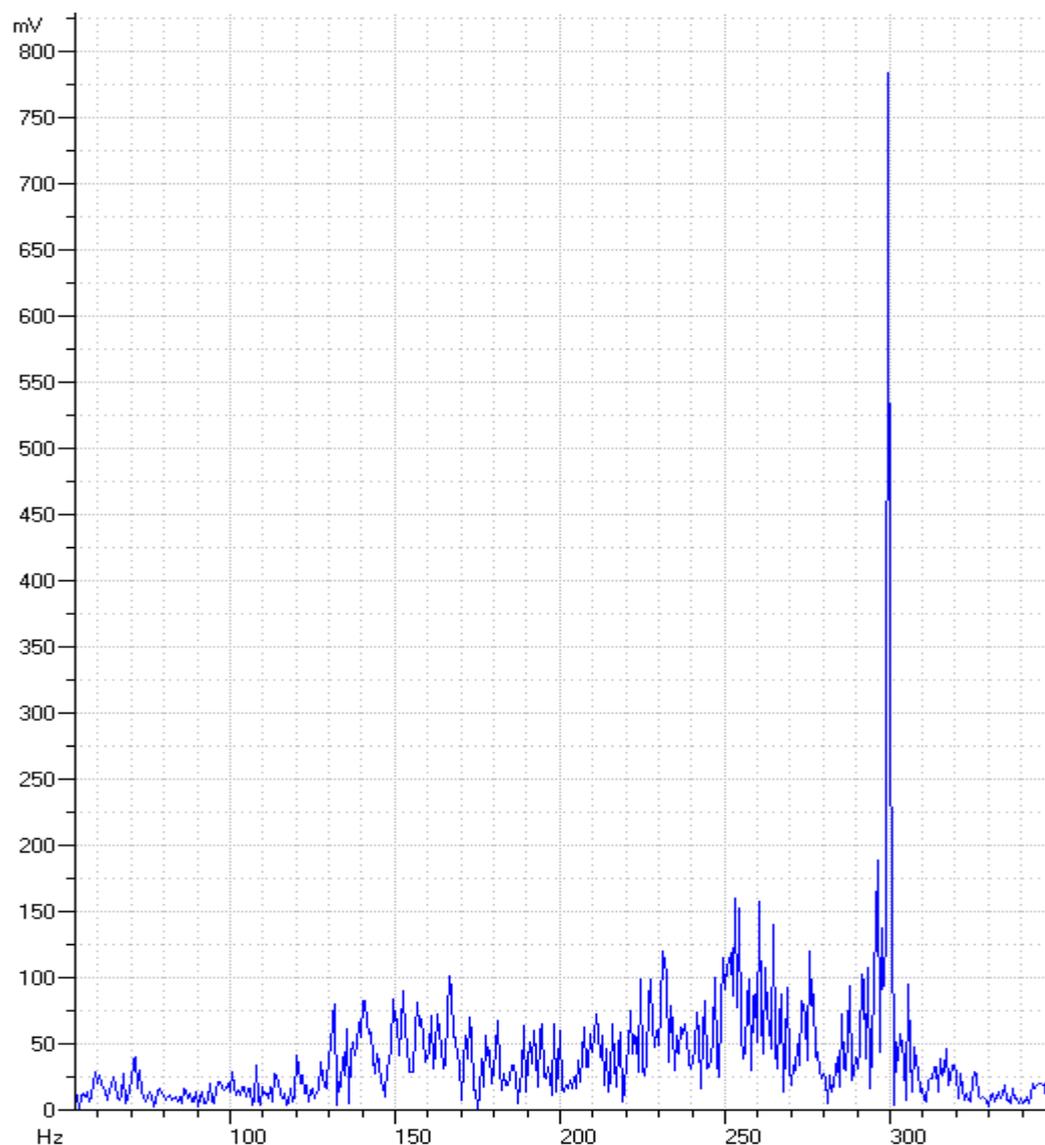
**Рис. 3а** - Вибрация новых подшипников. Отсутствует модуляция и ударные импульсы.



**Рис. 3б** - Спектральный анализ вибрации новых подшипников.



**Рис. 3с** - Вибрация изношенных подшипников. Модуляция и ударные импульсы ярко выражены.



**Рис. 3d** - Спектральный анализ вибрации изношенных подшипников.

Метод позволяет разделить возникающие при эксплуатации дефекты каждой из поверхностей качения на две группы - износ, характеризующийся плавной модуляцией сил трения, и раковины (трещины), характеризующиеся импульсным изменением сил трения. Кроме того метод позволяет обнаружить и определить характер динамических нагрузок, действующих на подшипник со стороны механизма. В список дефектов, обнаруживаемых по динамическим нагрузкам на поверхности качения входят и дефекты монтажа подшипника, такие как перекос колец

подшипника, повышенный (неоднородный) радиальный или осевой натяг, и другие.

### **Выводы**

Из известных методов диагностики подшипников качения крановых колес по вибрации наибольшую эффективность имеет первый метод поэтапного накопления результатов спектрального анализа в результате работы подшипников. В результате применения этого метода диагностика проводится с минимальными ошибками.

Основные особенности диагностики низкооборотных подшипников определяются нестабильностью режимов работы машины и низким уровнем высокочастотной вибрации.

Качество диагностики низкооборотных подшипников методом спектрального анализа растет с повышением динамического диапазона и линейности технических средств спектрального анализа сигналов вибрации.

### **Список использованных источников**

1. Барков А. В. Диагностика и прогноз состояния подшипников качения по сигналу вибрации / А. В. Барков // Судостроение. – 1985. – № 3. – С. 21–23.
2. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования / А. В. Александров, А. В. Барков, Н. А. Баркова, В. А. Шафранский // Судостроение. – 1986.
3. Barkov A. V. Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings / A. V. Barkov, N. A. Barkova, J. S. Mitchell // Sound Vibration. – 1995. – June. – P. 10–17 ; September. – P. 27–31.
4. Барков А. В. [Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации](#) / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – СПб. : АО ВАСТ, 1997.
5. Azovtsev A. Y. [Improving the accuracy of Rolling Element Bearing Condition Assessment](#) / A. Y. Azovtsev, A. V. Barkov, D. L. Carter // Proceedings of the 20th Annual

Meeting of the Vibration Institute, Saint Louis, Missouri, USA. – 1996. – P. 27-30.

6. Азовцев А. Ю. [Новое поколение систем диагностики и прогнозирования технического состояния](#) / А. Ю. Азовцев, А. В. Барков. – СПб. : АО ВАСТ, 1994.

***Чернышенко А.В., Мельниченко А.А., Павлова А.А.*** «Особенности диагностики низкооборотных подшипников качения в буксах механизма передвижения мостовых кранов»

В статье проведен обзор основных современных методов диагностики низкооборотных подшипников качения. Предложено оборудование для реализации одного из методов и приведены результаты эксперимента.

***Чернышенко О. В., Мельниченко О.А., Павлова Г.О.*** «Особливості діагностики низькооборотних підшипників качення в буксах механізму пересування мостових кранів»

У статті проведений огляд основних сучасних методів діагностики низькооборотних підшипників качення. Запропоновано обладнання для реалізації одного з методів і наведені результати експерименту.

***Chernishenko A., Melnichenko A., Pavlova A.*** «Features of diagnostics of the low-circulating rolling bearings in axel boxes of mechanism of movement of travelling cranes»

The review of basic modern methods of diagnostics of the low-circulating rolling bearings is conducted in the article. The equipment is offered for realization of one of methods and the results of experiment are resulted.