



# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

О. В. ИВАНОВ, В. П. ЛЯНЗБЕРГ

*Рассмотрены методы контроля и диагностики подшипников качения, основанные на измерении параметров вибрации. Описаны базирующиеся на этих методах приборы контроля.*

*Methods of control and diagnostics of rolling-contact bearings based on measurement of vibration parameters are considered. Instrumentation for implementation of these methods is described.*

Подшипники качения являются самым распространенным и наиболее уязвимым элементом любого роторного механизма. Они осуществляют пространственную фиксацию вращающихся роторов и воспринимают основную часть статических и динамических усилий, возникающих в механизме. Поэтому техническое состояние подшипников является важнейшей составляющей, определяющей работоспособность механизма в целом.

Для повышения ресурса и надежности оборудования, сокращения затрат, связанных с ремонтом и простоями, необходима система точного диагностирования текущего технического состояния подшипников качения. В связи с этим широкое распространение во всем мире получили методы контроля и диагностики, базирующиеся на измерении параметров вибрации. Это обусловлено тем, что вибрационные сигналы несут в себе информацию о состоянии механизма и подшипниках в частности. Теория и практика анализа вибросигналов настолько отработана, что можно получить достоверную информацию о текущем техническом состоянии не только подшипника, но и его элементов.

В настоящее время в практике используются четыре метода оценки технического состояния подшипников качения: ПИК-фактора, прямого спектра, спектра огибающей и ударных импульсов. Рассмотрим подробнее каждый из них.

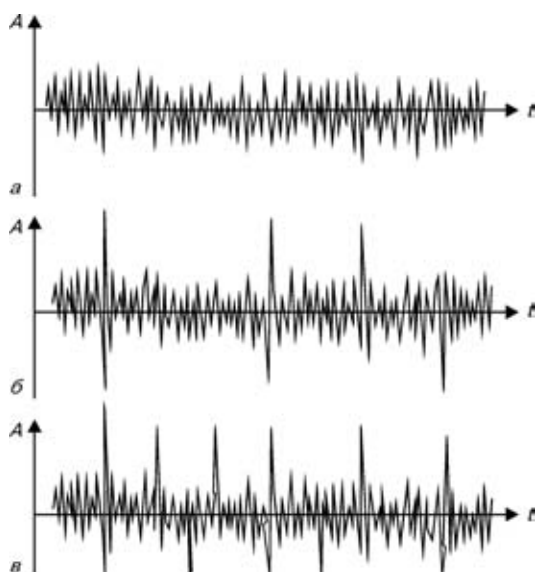


Рис. 1. Характер вибросигналов в процессе работы подшипника, полученных методом ПИК-фактора

**Метод ПИК-фактора.** Для контроля технического состояния подшипников данным методом необходимо иметь обычный виброметр, позволяющий измерять два параметра вибросигнала: среднеквадратичное значение (СКЗ) уровня вибрации, т. е. энергию вибрации; пиковую амплитуду (ПИК) вибрации (положительную, отрицательную или полный размах — значения не имеет). Отношение двух этих параметров ПИК/СКЗ называется ПИК-фактором.

В осциллограмме нового хорошо смазанного подшипника присутствует стационарный шумового характера (рис. 1, а). С течением времени, по мере образования дефектов на деталях подшипника, в сигнале начнут появляться отдельные короткие амплитудные пики, соответствующие моментам соударения дефектов (рис. 1, б). В дальнейшем с развитием дефекта вначале возрастает амплитуда пиков, затем постепенно увеличивается и их количество (рис. 1, в). Например, появившийся на одном из шариков дефект создает впоследствии забоину на кольце, которая переносится на другой шарик; дефекты шариков начинают вырывать сепаратор и т. д. до полного разрушения.

Результаты измерений параметров вибросигналов показаны на рис. 2. Вначале по мере появления и развития дефекта возрастает функция ПИК, а СКЗ изменяется очень мало, поскольку отдельные очень короткие амплитудные пики практически не приводят к изменению энергетических характеристик сигнала. В дальнейшем по мере увеличения амплитуд и количества пиков начинает увеличиваться энергия сигнала, возрастает СКЗ вибрации. Отношение ПИК/СКЗ из-за временного сдвига между ними имеет явно выраженный максимум на

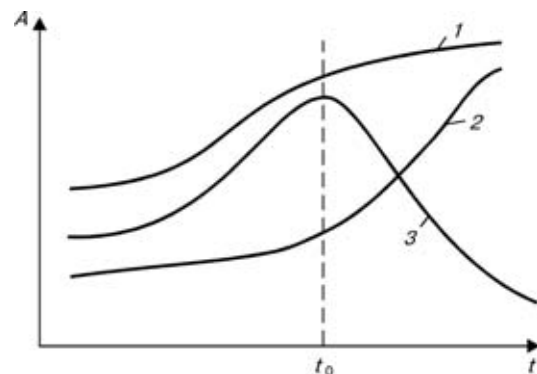


Рис. 2. Изменение во времени параметров вибросигнала: 1 — ПИК; 2 — СКЗ; 3 — ПИК/СКЗ (ПИК-фактора)



временной оси. На этом и основывается метод ПИК-фактора. Экспериментально установлено, что момент прохождения функции ПИК-фактор через максимум  $t_0$  (рис. 2) соответствует остаточному ресурсу подшипника порядка 2–3 недели.

Основным достоинством этого метода является его простота (для реализации нужен обычный вибротметр общего уровня).

Недостатки метода — слабая помехозащищенность и необходимость проведения многократных измерений в процессе эксплуатации. Установить датчик непосредственно на наружной обойме подшипника практически невозможно, поэтому сигнал вибрации характеризует не только подшипник, но и другие узлы механизма, что в данном случае рассматривается как помехи. Чем дальше установлен датчик от подшипника и сложнее кинематика самого механизма, тем меньше достоверность метода. Кроме того, получить оценку состояния по одному замеру невозможно.

**Метод прямого спектра.** Для контроля технического состояния подшипников по данному методу необходим анализатор спектра вибрации (виброанализатор). Метод базируется на анализе спектра вибрации — выявлении периодичности (частоты) появления амплитудных всплесков (рис. 1, в). Вибрационный сигнал анализируется узкополосным виброанализатором, и по частотному составу спектра (рис. 3) можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника. Каждому дефекту на элементе подшипника (тела качения, внутреннем и наружном кольце, сепараторе) соответствуют свои частоты, которые зависят от кинематики подшипника и скорости его вращения. Наличие той или иной частотной составляющей в спектре сигнала говорит о возникновении соответствующего дефекта, а амплитуда этой составляющей — о глубине дефекта.

К достоинствам метода следует отнести: высокую помехозащищенность (маловероятно наличие в механизме источников, создающих вибрации на тех же частотах, что и дефекты подшипника); высокую информативность метода; возможность оценки состояния элементов подшипника (тел качения, внутреннего и наружного кольца, сепаратора), поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.

Недостатки метода: высокая стоимость, если использовать виброанализатор только для конт-

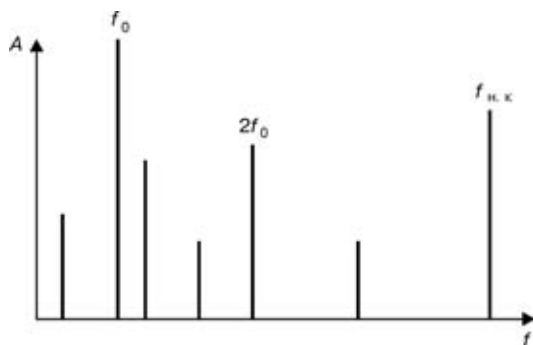


Рис. 3. Частотный сигнал, полученный методом прямого спектра при анализе дефектов подшипника:  $f_0$  — частота вращения;  $f_{н.к}$  — частота перекатывания тел качения по наружному кольцу

роля подшипников; малая чувствительность к зарождающимся и слабым дефектам в связи с тем, что в большинстве случаев подшипники являются маломощными источниками вибрации. Небольшой скол на шарике или дорожке не в состоянии заметно качнуть механизм так, чтобы можно было увидеть частотную составляющую в спектре. И только при достаточно сильных дефектах амплитуды этих частотных составляющих начинают заметно выделяться в спектре.

Этот метод используется достаточно широко, особенно профессионалами, и дает хорошие результаты.

**Метод спектра огибающей.** Для контроля технического состояния подшипников по данному методу необходим анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации. Метод базируется на анализе высокочастотной составляющей вибрации и выявлении модулирующих ее низкочастотных сигналов.

Из рис. 1 видно, что высокочастотная часть сигнала меняет свою амплитуду во времени, т. е. она модулируется каким-то более низкочастотным сигналом. Выделение и обработка этой информации и составляют основу метода. Рассмотрим подшипник с зарождающимся дефектом (скол, трещина и т. д.) на наружной обойме. При ударе тел качения о дефект возникают высокочастотные затухающие колебания, которые будут повторяться (модулироваться) с частотой, равной частоте перекатывания тел качения по наружному кольцу. Именно в этом модулирующем сигнале содержится информация о состоянии подшипника.

Установлено, что наилучшие результаты достигаются в том случае, если анализировать модуляцию не широкополосного сигнала, получаемого от акселерометра, а предварительно осуществить узкополосную фильтрацию сигнала, выбрать основную (несущую) частоту в диапазоне от 4 до 32 кГц и анализировать модуляцию этого сигнала. Для этого отфильтрованный сигнал детектируется, т. е. выделяется модулирующий сигнал (его еще называют огибающим), который подается на узкополосный виброанализатор. В результате получаем спектр интересующего нас модулирующего сигнала, или спектр огибающей, что и дало название методу.

Обработка сигнала очень сложна, но результат того стоит. Дело в том, что небольшие дефекты подшипника не в состоянии вызвать заметной вибрации в области низких и средних частот. В то же время для модуляции высокочастотных вибрационных шумов энергии возникающих ударов оказывается вполне достаточно. Таким образом, метод обладает очень высокой чувствительностью. При отсутствии дефектов спектр огибающей представляет собой почти горизонтальную волнистую линию (рис. 4, а). При появлении дефектов над уровнем линии сплошного фона начинают возвышаться дискретные составляющие, частоты которых однозначно просчитываются по кинематике и оборотам подшипника (рис. 4, б). Частотный состав спектра огибающей позволяет идентифицировать наличие дефектов, а превышение соответствующих состав-



Сравнительные характеристики методов по пятибалльной системе

№ п/п	Параметр	Оценка метода			
		ПИК-фактора	прямого спектра	спектра огибающей	ударных импульсов
1	Диагностика зарождающихся дефектов	—	*	*****	****
2	Диагностика развитых дефектов	**	***	*****	*****
3	Оценка состояния по результатам однократного измерения	—	**	*****	*****
4	Оценка состояния по результатам периодического или постоянного контроля	***	****	*****	*****
5	Разделение состояния подшипника по кинематике и смазке	—	—	—	****
6	Определение дефектов (тела качения, дорожки, сепаратора и т. д.)	—	***	****	—
7	Помехозащищенность	*	**	*****	****

ляющих над фоном однозначно характеризует глубину каждого дефекта.

*Достоинствами этого метода являются высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность, недостатком — высокая стоимость (необходим анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации).*

Описанный метод очень широко используется профессионалами в стационарных системах контроля технического состояния оборудования.

**Метод ударных импульсов.** Он основан на измерении и регистрации механических ударных волн, вызванных столкновением двух тел. Ускорение частиц материала в точке удара вызывает волну сжатия, которая распределяется в виде ультразвуковых колебаний. Ускорение частиц материала в начальной фазе удара зависит только от скорости столкновения и не зависит от соотношения размеров тел. Период времени мал, и заметной деформации не происходит. Величина фронта волны является мерой скорости столкновения (удара) двух тел. Во второй фазе удара поверхности двух тел деформируются, энергия движения отклоняет тело и вызывает в нем колебания.

Для измерения ударных импульсов используется пьезоэлектрический датчик, на который не

оказывают влияние фон вибрации и шум. Вызванная механическим ударом фронтальная волна сжатия возбуждает в нем затухающие колебания (рис. 5). Пиковое значение амплитуды этого затухающего колебания прямо пропорционально скорости удара. Поскольку затухающий переходный процесс очень хорошо определяется и имеет постоянную величину затухания, то его можно отфильтровать от других сигналов, т. е. от сигналов вибрации. Измерение и анализ затухающего переходного процесса — основа метода ударных импульсов. Наблюдаемый процесс аналогичен тому, как отзывается на удары камертон — он всегда звенит на своей собственной частоте. Так и подшипниковые узлы от соударения дефектов «звенят» на своей частоте, которая практически всегда находится в диапазоне 28... 32 кГц. В отличие от камертона эти колебания очень быстро затухают, поэтому на осциллограммах они выглядят как импульсы, что и дало название методу. Результаты измерений очень легко нормировать по скорости соударения зная геометрию подшипника и его обороты. Амплитуды ударных импульсов однозначно связаны со скоростью соударения и глубиной дефектов. Поэтому по амплитудам ударных импульсов можно достоверно диагностировать наличие дефектов и их глубину.

*К числу достоинств этого метода относятся высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность. Он довольно прост и дешев в реализации — существуют простые портативные приборы. Однако существует одно ограничение, связанное с конструктивным исполнением механизма. Поскольку речь идет об измерении ультразвуковых волн колебаний, которые очень сильно затухают на границах разъемных соеди-*

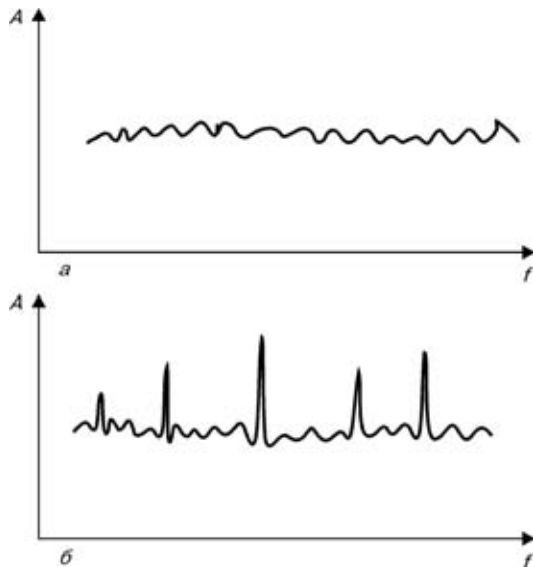


Рис. 4. Спектр огибающей при отсутствии (а) и появлении (б) дефектов на подшипнике



Рис. 5. Осциллограмма подшипника при его диагностировании методом ударных импульсов



Рис. 6. Анализатор спектра вибрации 795М

нений, то для точности измерений необходимо, чтобы между наружным кольцом подшипника и местом установки датчика существовал сплошной массив металла. В большинстве случаев это не вызывает проблем.

Метод широко используется профессионалами, прост и доступен обслуживающему персоналу.

**Приборы контроля.** Фирма «Сервис технологических машин» совместно с НПП «Контест» производит и поставляет приборы — анализатор спектра вибрации 795М и тестер состояния подшипников 77Д11. Оба прибора сертифицированы (сертификат соответственно № UA-MI/1-676-99 и UA-MI/1-677-99).

Анализатор спектра вибрации 795М (рис. 6) — малогабаритный, автономный, микропроцессорный виброизмерительный прибор с двойным питанием (от внутренних аккумуляторов или от сетевого блока питания БП-05). Он предназначен для измерения и спектрального анализа параметров вибрации, балансировки и наладки механизмов роторного типа. Прибор позволяет измерять динамические сигналы с последующей их записью в энергонезависимую память, просматривать, анализировать и передавать их в базу данных на персональный компьютер. Он может работать как автономный анализатор, а также как коллектор данных в системе прогнозируемого обслуживания оборудования совместно с программным обеспечением. Использование прибора обеспечивает объективный контроль текущего технического состояния механизмов, исключая аварийные остановки, и позволяет технически обоснованно определить необходимые сроки, объем и содержание ремонтных и наладочных работ, контролировать качество их выполнения.

Анализатор спектра вибрации 795М применяется в следующих случаях:



Рис. 7. Тестер состояния подшипников 77Д11

измерения параметров вибрации (виброускорения, виброскорости, виброперемещения) работающего оборудования;

спектрального анализа сигнала вибрации (частотная область);

анализа формы сигнала (временная область);

бесконтактного измерения частоты вращения с помощью оптического инфракрасного таходатчика; динамической балансировки роторов в собственных опорах, на эксплуатационных режимах (плоскостей коррекции — до 8, точек контроля вибрации — до 14);

измерения амплитудно- и фазово-частотных характеристик вибрации механизма при режимах разгона/выбега;

анализа спектра огибающей вибросигнала для обнаружения и идентификации зарождающихся дефектов подшипников;

измерения амплитуды ударного ускорения вынужденной высокочастотной вибрации (31 кГц), вызванной ударными импульсами для определения технического состояния подшипников качения.

Индикатор вибродиагностический 77Д11 (рис. 7) — малогабаритный микропроцессорный прибор, предназначенный для измерения уровня высокочастотной вибрации (31 кГц), создаваемой ударными импульсами в работающих механизмах, что позволяет без остановки оборудования определять состояние подшипников качения, качество их смазки и монтажа, а также состояние насосов высокого давления, форсунок дизелей, клапанов поршневых компрессоров и т. п. Методики измерения разработаны в ЦНИИ Морского флота (г. Санкт-Петербург). Использование прибора не требует специальной подготовки обслуживающего персонала, а его применение на уровне производственных участков позволяет получать оперативную информацию, исключая аварийные остановки оборудования.