

УДК 621.311

## ТИПОВЫЕ ОШИБКИ ПРИ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Н. В. ГРУНТОВИЧ, А. А. АЛФЕРОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**П. М. КОЛЕСНИКОВ**

*Республиканское унитарное предприятие  
«Гомельтранснефть Дружба», Республика Беларусь*

### **Введение**

В настоящее время износ энергетического и технологического оборудования составляет 60–80 %. Для решения задач повышения надежности оборудования в республике аккредитовано порядка 190 лабораторий в области технической диагностики, а по вибродиагностике – только 5 лабораторий. В то же время при подготовке инженеров-электриков, механиков, энергетиков согласно учебным планам не изучается такая наука как техническая диагностика. Специалисты заводских лабораторий обучаются на краткосрочных курсах в республике или за рубежом в зависимости от того, в какой стране приобретается вибродиагностическое оборудование. В Могилевском университете выпускается ежегодно небольшая группа специалистов по неразрушающему контролю, в частности ультразвуковой дефектоскопии и толщинометрии, магнитопорошковой дефектоскопии. Указанные методы применяются при диагностировании сосудов, котлов, трубопроводов. Методы и приборы диагностирования электрооборудования нигде не преподаются и не изучаются. По этой причине перед специалистами заводских лабораторий (если они имеются) возникают серьезные проблемы при организации диагностических работ. В первую очередь это оказывает влияние на качество и достоверность результатов диагностирования.

### **Постановка задачи и решение**

В процессе измерений виброакустических сигналов возникают погрешности: инструментальная, методическая и субъективная.

Инструментальная погрешность обусловлена погрешностью применяемых приборов. Методические погрешности могут возникнуть из-за несовершенства разработки теории вибрации, положенной в основу метода измерений; неточности соотношений, используемых для нахождения оценки признаков вибрации и их причины, а также из-за несоответствия измеряемой величины и ее диагностической модели. Они появляются в результате методических и организационно-технических ошибок в ходе измерения и обработки виброакустических сигналов.

Приведем основные методические ошибки при техническом диагностировании:

1. Плохое знание физических основ работы объекта диагностирования.
2. Неумение определить неисправность прибора и достоверность измерений.
3. Неправильный выбор частотного диапазона.
4. Неправильный выбор режима работы оборудования при диагностировании.

5. Неумение учитывать помехи и проводить комплексное диагностирование.
6. Неправильный выбор реперных точек.
7. Неправильный выбор методов обработки спектров вибрации.

Рассмотрим указанные проблемы подробнее.

1. *Плохое знание физических основ работы объекта диагностирования.* Нынешние выпускники технических вузов не изучают теорию и методы вибродиагностирования различного оборудования, а на предприятиях им приходится заниматься практическим диагностированием. Диагностирование сложных объектов после изучения инструкции по применению средств измерений без знания основ теории вибрации диагностируемого объекта напоминает «игру зайца на барабане». При такой подготовке специалистов диагностируются только простейшие, очевидные дефекты. Например, для диагностики электрических машин необходимо хорошо владеть теорией электрических машин постоянного и переменного тока. Для диагностирования подшипников качения необходимо знать физику его работы. При диагностировании маслонаполненных трансформаторов важно знать динамику диагностических параметров во время работы трансформаторов.

Только по виброакустическим характеристикам можно выявить следующие дефекты асинхронных двигателей: неисправности подшипников скольжения и качения; нарушение соосности магнитного поля статора и ротора; ослабление расклиновки обмотки статора; ослабление жесткости крепления статорной обмотки в лобовой части; нарушение изоляции стяжных болтов активного железа статора; ослабление прессовки крайних пакетов электротехнической стали статора; магнитную несимметрию двигателя; омическую несимметрию фаз обмотки статора; магнитные потери, обусловленные работой тиристорных преобразователей; старение и высыхание изоляции статорной обмотки; неравномерность зазора между ротором и статором; дефекты в обмотке ротора; нарушение соосности двигателя и рабочего механизма, ослабление жесткости крепления подшипниковых опор; овальность ротора и бочки статора.

По спектрам вибрации можно также определить дефекты подшипников качения в процессе эксплуатации, а именно, заводские дефекты, которые приводят к интенсивному износу узлов подшипников качения и эксплуатационные дефекты:

- перекос внутреннего кольца;
- перекос наружного кольца;
- трещины на внутреннем кольце;
- износ сепаратора;
- неоднородный радиальный натяг;
- износ тел качения;
- загрязнение смазки.

2. *Неумение определить неисправность прибора и достоверность измерений.* Подобные ошибки встречаются часто у начинающих специалистов по диагностированию. В качестве иллюстрации подобных ошибок приведены различные спектры вибрации бака трансформатора (рис. 1 и 2).

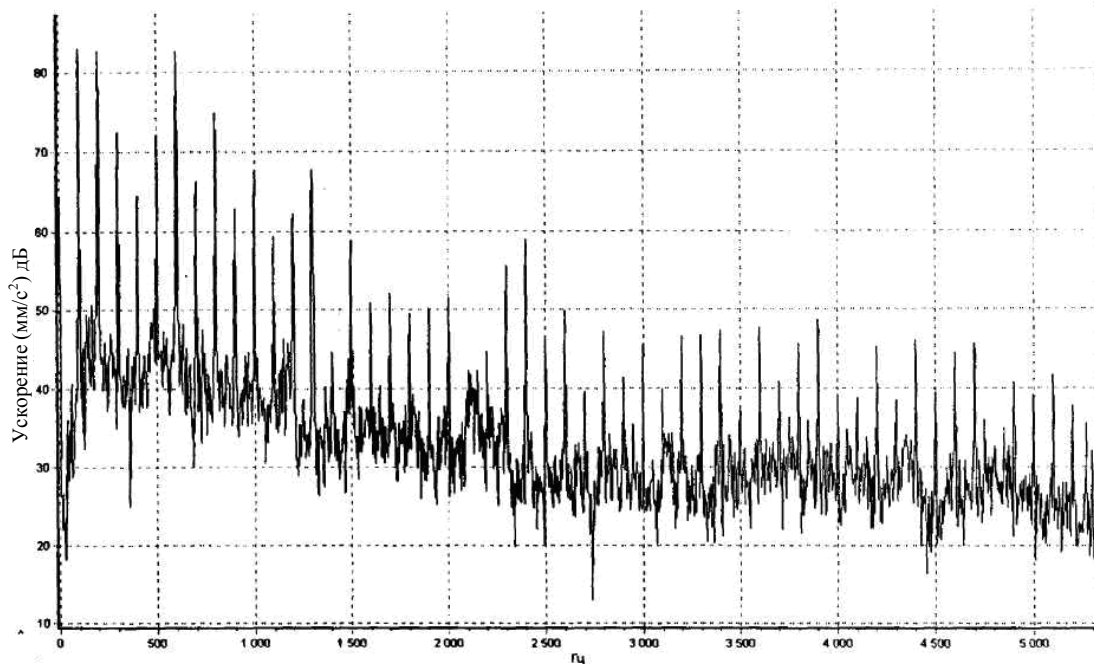


Рис. 1. Спектр вибрации трансформатора Т-1, фаза А, канал измерения исправен

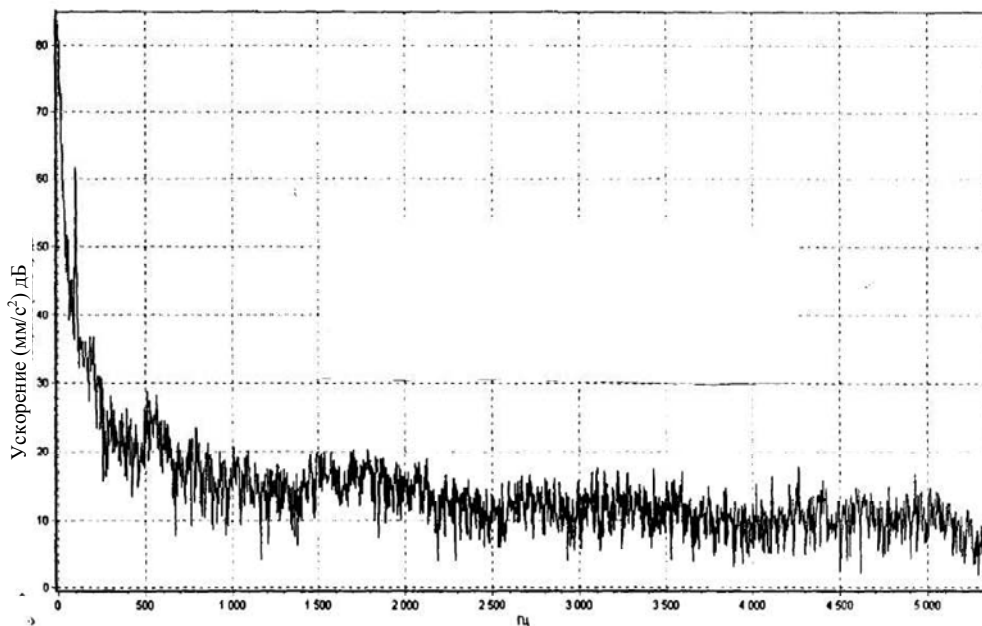


Рис. 2. Спектр вибрации трансформатора Т-1, фаза А, канал измерения неисправен

3. *Неправильный выбор частотного диапазона.* На практике многими специалистами проводится анализ вибрации в диапазоне 10–1000 Гц. В этот диапазон попадает около 40 % дефектов, например такие как: износ подшипников качения, кавитация насосов, плохая расклиновка обмотки статора, магнитная несимметрия (вертикальная и осевая), магнитная вибрация, обусловленная наличием высших гармоник, нарушение балансировки механизмов 750–3000 об/мин. В то же время 30 % дефектов выявляются в диапазоне от 0 до 10 Гц, а именно: крутильные колебания, помпаж, дефекты роторов АД, срыв масляного клина, паровая вибрация, нарушения балансировки механизмов

при  $n \leq 360$  об/мин, износ баббита подшипников  $n \leq 750$  об/мин и еще 30 % дефектов выявляются в диапазоне от 1000 до 20000 Гц: износ масла в подшипниках качения, кавитация насосов, плохая расклиновка обмотки статора, задевание лопаток турбин и ротора двигателя, магнитная вибрация, обусловленная наличием высших гармоник. Следовательно, правильный выбор частотного диапазона при вибродиагностировании определяется глубиной знаний физических процессов диагностируемого объекта.

4. *Неправильный выбор режима работы оборудования при диагностировании.* Очень важным является правильный выбор режима работы электрооборудования при диагностировании. Такими режимами являются: режимы минимальной и номинальной нагрузки, режим холостого хода, режим с кавитацией (и без) для центробежных насосов, для грузоподъемных машин – режим спуска и подъема груза.

5. *Неумение учитывать помехи.* При вибродиагностировании необходимо учитывать помехи и проводить комплексное диагностирование. При диагностировании электрических двигателей помехами могут быть: рядом работающие механизмы, качество напряжения и тока электрической сети; кавитация насосов, износ смазки, работа электрических машин от тиристорных устройств. Из теории вибрации известно, если общий уровень вибрации двух рядом работающих механизмов имеет равное значение, то величина помехи для каждого механизма будет равна не более 3 Дб. Если эта разница будет более шести децибел, то можно не учитывать взаимное влияние помех.

6. *Неумение проводить комплексное диагностирование.* Как показывает практика, многие специалисты не видят разницы между комплексным диагностированием и многопараметрическим. При многопараметрическом диагностировании техническое состояние объекта оценивается по изменению каждого параметра в отдельности. При комплексном диагностировании оценка технического состояния какого-либо механизма производится при одновременном учете влияния двух и более параметров (дефектов) на соответствующий узел агрегата. Например, если электрический двигатель имеет значительное нарушение балансировки ротора, или неравномерность зазора между телами качения и кольцами, то будет одна скорость износа подшипника. Если же присутствуют одновременно эти два дефекта в двигателе, то скорость износа подшипника качения будет значительно больше. В этом случае необходимо назначить меньшее предельное значение параметра вибрации и выводить двигатель в ремонт с учетом развития двух дефектов. Таких примеров комплексного диагностирования электрооборудования можно привести множество.

7. *Неправильный выбор реперных точек измерения.* Имеются особенности при вибродиагностировании подшипников скольжения (ПС), подшипников качения (ПК) и магнитной системы электрических машин. Если при измерении вертикальной вибрации ПС датчик устанавливается на крышке подшипника, то при диагностировании подшипников качения датчик устанавливается в местах прохождения максимального вибрационного сигнала от узлов подшипника. Это принципиально, так как если в месте установки датчика сигнал будет ослабленным, то можно пропустить дефект. Признаком высокой культуры при измерении вибрации является то, что места установки датчиков обозначаются белой краской в виде круга или квадрата, а краска внутри круга зачищается и поверхность металла покрывается смазкой. Примеры расположения местустановки датчиков изображены на рис. 3.

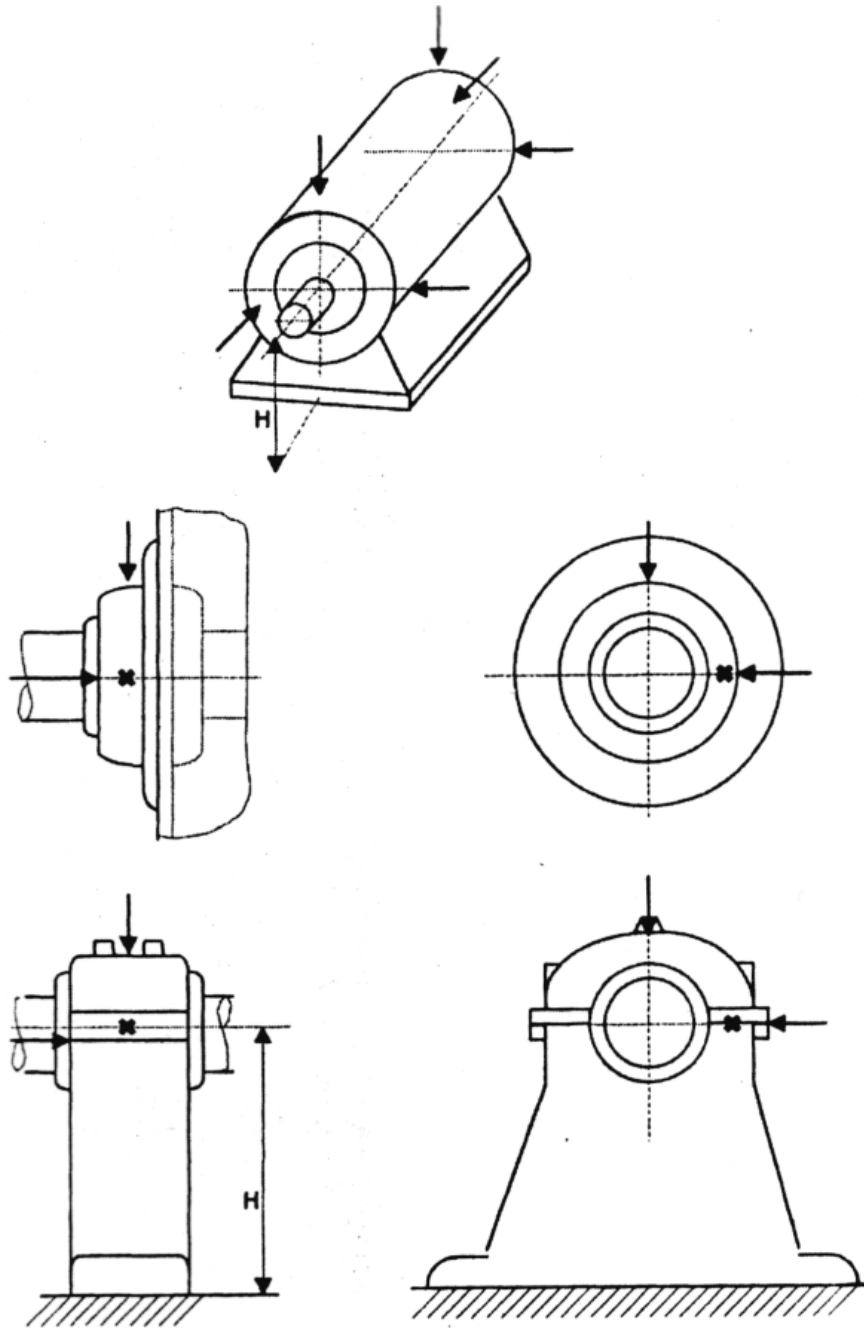


Рис. 3. Места установки датчиков на корпусе электрической машины и подшипниковых опорах

8. *Неправильный выбор метода обработки спектров вибрации.* В настоящее время используется в основном два метода обработки спектров: метод огибающей и метод прямого спектра. При использовании метода прямого спектра вычисляются информативные частоты вибрации для всех дефектов. В данном случае возможны следующие ошибки: неправильное определение информативных частот и неправильное определение предельного значения вибрации для соответствующих дефектов. При использовании метода огибающей вырезается третьоктавная полоса в диапазоне частот 800–2000 Гц. Для выбранной области частот вычисляется коэффициент амплитудной модуляции, по величине которого принимается решение о развитии соответствующего дефекта. При применении данного метода от пользователя требуется глубокое знание физики работы диагностируемого объекта и хорошие навыки по

применению данного метода. Достоверность диагностирования с применением метода огибающей колеблется в пределах 60 % для начинающих специалистов.

Рассмотрим организационно-технические ошибки при диагностировании:

- отсутствие банка диагностической информации и дефектов по отрасли однотипных механизмов;
- неправильное оформление заявки на подшипники качения;
- отсутствие входного контроля качества подшипников качения перед установкой на механизм;
- плохая подготовка посадочных мест для подшипников качения;
- нарушение технологии при съеме и посадке подшипников качения;
- неумение выбрать пороговое значение при оформлении заключения.

*Отсутствие банка диагностической информации и дефектов по отрасли однотипных механизмов.* Наличие банка диагностической информации у специализированной организации или непосредственно на предприятии значительно повышает достоверность диагностирования и прогнозирования технического состояния оборудования. К сожалению, в настоящее время банк диагностической информации создается лишь в некоторых специализированных организациях и только по отдельным типам оборудования.

*Неправильное оформление заявки на подшипники качения.* При подаче заявки в службу снабжения энергетикам необходимо указать все характеристики подшипника качения. В этом случае есть гарантия, что подшипник качения будет подобран к соответствующему механизму с учетом режима его работы и нагрузки. Например, если просто указать подшипник № 206, не указывая все остальные характеристики, то высока вероятность того, что подшипник качения может не соответствовать режиму работы механизма (рис. 4).

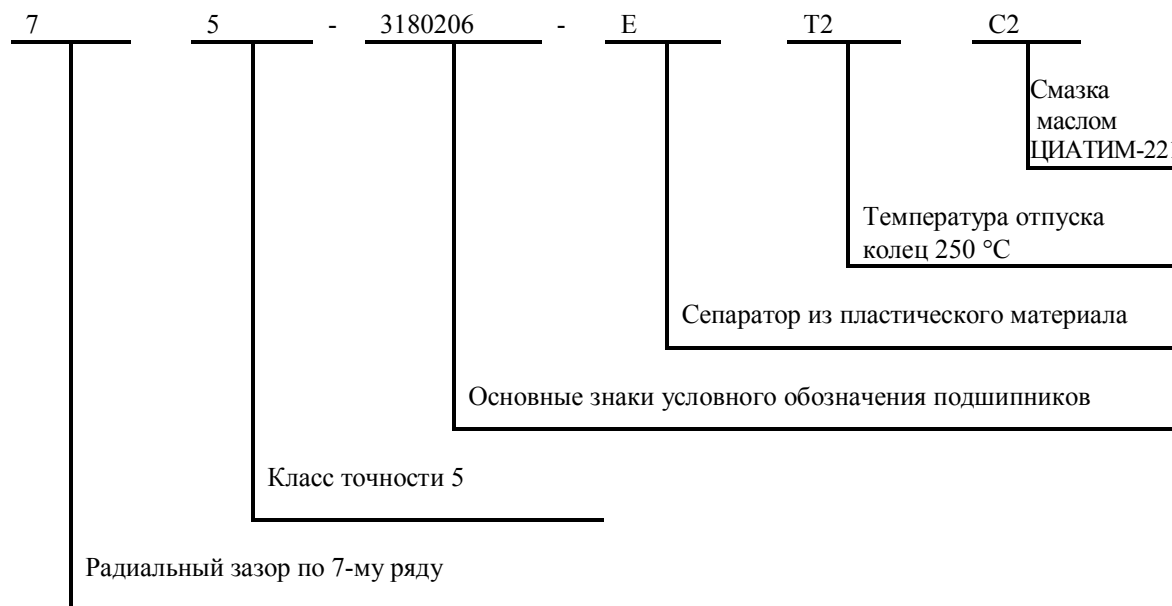


Рис. 4. Пример условного обозначения подшипника с дополнительными знаками

*Отсутствие входного контроля качества подшипников качения перед установкой на механизм.* К типовым дефектам подшипников качения следует отнести (рис. 5, 6):

- некруглость тел качения;
- овальность внутреннего кольца;
- трехвыпуклость внутреннего кольца;
- неравномерность зазоров между телами качения и кольцами (разные диаметры тел качения);
- повышенная волнистость колец;
- раковины на кольцах и телах качения.

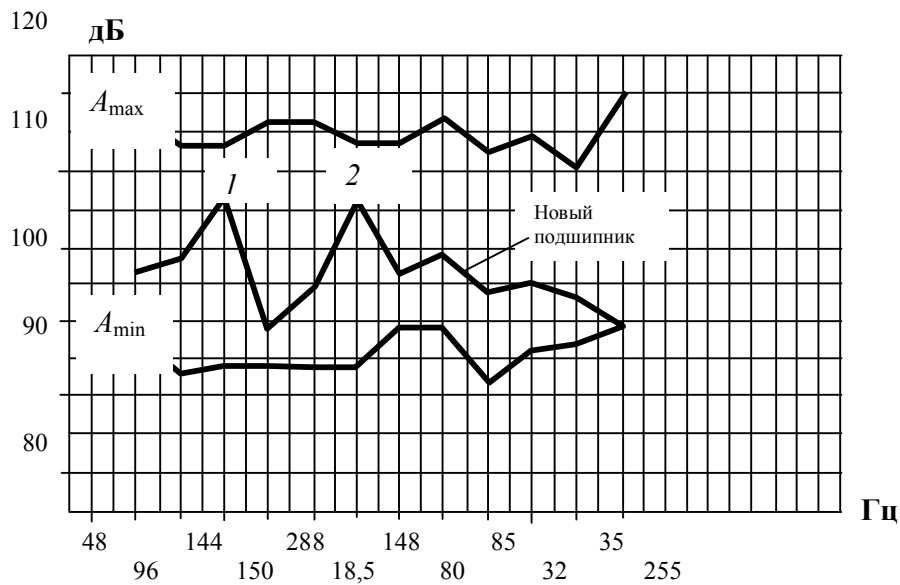


Рис. 5. Спектр вибрации нового подшипника качения № 314 с различными дефектами:  
1, 2 – неравномерность зазоров между телом качения и кольца

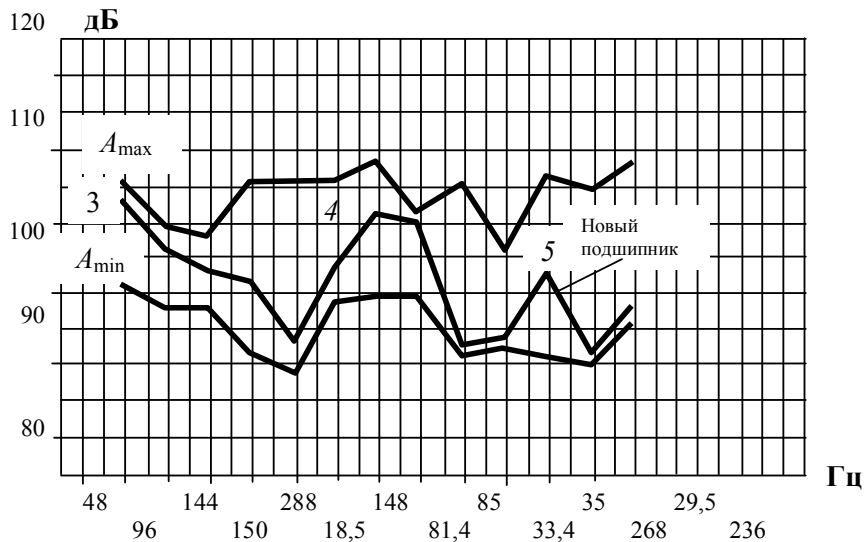


Рис. 6. Спектр вибрации нового подшипника качения № 317 с различными дефектами:  
3 – овальность; 4 – дефекты тел качения; 5 – дефекты внутреннего кольца

Таблица 1

Сравнительный анализ технического состояния подшипников качения и их пригодности к дальнейшей эксплуатации по результатам испытаний на стенде

Тип подшипника	Срок эксплуатации	Страна-изготовитель	Бракотка		Дефекты			
			по ГОСТу	по ХКИ	микро-волнистость ВК	гранность ТК	зазор	уровень белого шума
312 № 1	новый	РБ	брак	брак	+	+	–	93
312 № 2	новый	РБ	брак	брак	овал	–	–	97
312 № 3	б/у	РБ	брак	брак	+	–	+	80–89
312 № 4	новый	РБ	брак	брак	+	–	+	86
312 № 5	новый	РБ	брак	брак	+	–	+	89
312 № 6	новый	РБ	норма	норма	+	–	–	67–78
412 № 1	новый	Украина	брак	норма	–	+	–	89–95
412 № 2	новый	Украина	норма	норма	–	–	–	76–85
412 № 3	б/у	Украина	брак	брак	–	+	–	105
412 № 4	б/у	Украина	брак	брак	–	+	–	105
412 № 5	новый	Украина	брак	брак	+	–	+	88–98
412 № 6	новый	Украина	брак	брак	–	+	+	75–83
412 № 7	новый	Украина	брак	брак	–	+	+	69–78
412 № 8	новый	Украина	брак	брак	–	+	+	79–89
412 № 9	новый	Украина	брак	брак	–	+	+	70–90
412 № 10	новый	Украина	норма	норма	–	–	+	63–83
412 № 11	новый	Украина	норма	норма	–	–	+	63–83
412 № 12	новый	Украина	норма	норма	–	–	+	62–80
6228 № 1	б/у	Япония	брак	брак	–	–	–	106
6228 № 2	б/у	Япония	норма	норма	–	–	–	72–82
6228 АК	б/у	РФ	брак	брак	–	–	–	104
7520 № 1	б/у	РБ	норма	норма	овал	+	–	92–96

Из табл. 1 следует, что повышенная микроволнистость внутреннего кольца имеется у 22 % новых подшипников и 32 % подшипников имеет гранность тел качения. Из всей выборки подшипников самым лучшим по спектру вибрации оказался 6228 (Япония), который был взят со свалки. Последнее свидетельствует том, что на данном предприятии плохо поставлены диагностические работы. В общем в данной выборке оказалось 54 % новых подшипников качения низкого качества.

*Плохая подготовка посадочных мест для подшипников качения.* При длительной эксплуатации роторных механизмов появляется овальность вала, конусность вала и уменьшение диаметра вала. Если не проверить посадочное место и не устранить дефект, то возможно проворачивание внутреннего кольца подшипника качения или создается дополнительный дефект в виде овальности внутреннего кольца подшипника.

*Нарушение технологии при съеме и посадке подшипников качения.* При посадке и съеме подшипников качения необходимо строго соблюдать технологический процесс. Довольно часто при посадке роликоподшипников происходит перекокс наружного кольца, который приводит к значительной осевой вибрации подшипниковой опоры на соответствующих информативных частотах и приводит к сокращению срока службы подшипников качения.



В качестве иллюстрации приведен спектр осевой вибрации подшипниковой опоры в диапазоне 0–200 Гц и 0–1000 Гц. На частоте 130 Гц осевой вибрации выделяется значительная амплитуда сигнала вибрации.

В процессе эксплуатации подшипников качения возникают различные дефекты: абразивный износ, задиры, бриннелирование (наклеп) и т. д. (рис. 7).

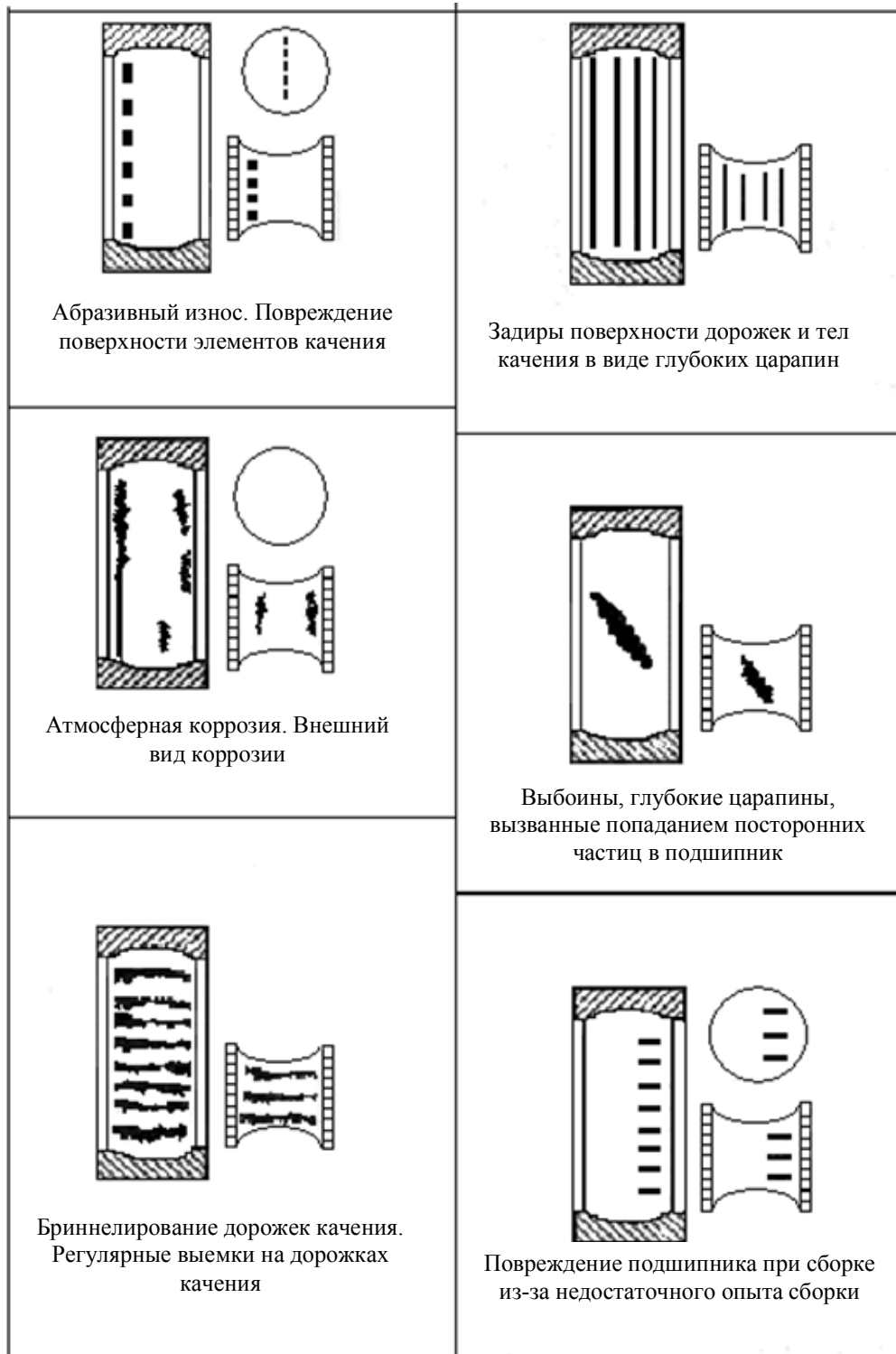


Рис. 7. Различные дефекты подшипников качения

Неумение выбрать пороговое значение при оформлении заключения. В процессе вибродиагностирования очень важно правильно выбрать предельные значения вибрации оборудования (табл. 2). Эти значения могут быть определены на основе анализа заданной выборки машин (6–10 ед.) или на основе международных стандартов. Занижение предельного значения приводит к ремонту вполне исправного оборудования, а завышение предельного значения вибрации может привести к пропуску дефекта в процессе диагностирования и поломке механизма.

Таблица 2

**Диапазоны интенсивности вибрации и примеры их применения для машин малой мощности (класс I), средней мощности (класс II), большой мощности (класс III) и турбомашин (класс IV)**

Диапазон интенсивности вибрации		Примеры качественной оценки для отдельных классов машин			
Диапазон	$V_{эф}$ (мм/с) в пределах диапазона	Класс I (15 кВт)	Класс II (15–300 кВт)	Класс III (> 300 кВт)	Класс IV (турбонасосы)
0,28	0,28	A	A	A	A
0,45	0,45				
0,71	0,71				
1,12	1,12	B	B	B	B
1,8	1,8				
2,8	2,8	C	C	C	C
4,5	4,5				
7,1	7,1	D	D	D	D
11,2	11,2				
18	18				
28	28				
45	45				
71	71				

### Заключение

1. При техническом диагностировании от специалистов требуется глубокое знание как физических основ диагностируемых объектов, так и теории измерения и обработки диагностических сигналов.

2. Специалисты промышленных предприятий должны владеть методологическими принципами управления износом и старением оборудования.

3. Для решения данной проблемы на высоком научно-техническом уровне необходимо вводить в учебные планы подготовки инженеров учебную дисциплину «Техническая диагностика энергетического оборудования».

### Литература

1. Грунтович, Н. В. Техническое диагностирование элементов атомной энергетической установки / Н. В. Грунтович. – Севастополь : ВВМИУ, 1984.
2. Вибродиагностика / Г. Ш. Розенберг [и др.]. – Санкт-Петербург : ПЭИПК, 2003.

Получено 14.12.2009 г.