

УДК 621.313.333

## ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**И. В. ПЕТРОВ**

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

### **Введение**

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования оборудования в промышленности. Назначением диагностирования является выявление неисправностей и предупреждение отказов, поддержание эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование состояния в целях полного использования доремонтного и межремонтного ресурса [1].

Существует значительное количество методов неразрушающего контроля, позволяющих проводить тестирование оборудования и выявлять дефекты без нарушения целостности оборудования. Однако далеко не все эти методы являются универсальными.

Одним из специализированных методов неразрушающего контроля является вибродиагностика. Она основана на анализе параметров вибрации, которая либо создается работающим оборудованием, либо является вторичной вибрацией, происхождение которой связано со структурой объекта, подвергающегося изучению. Чаще всего этот метод применяется для исследования подшипников качения, колесно-редукторных блоков, гидрооборудования и т. д.

Практически мгновенная реакция вибросигнала на изменение состояния оборудования является незаменимым качеством в аварийных ситуациях, когда определяющим фактором является скорость постановки диагноза и принятия решения [2].

Основным преимуществом вибродиагностики является возможность обнаруживать скрытые дефекты, получать информацию о состоянии оборудования, находящегося в труднодоступных местах, а также производить мониторинг и получать информацию о дефекте еще на стадии его появления. Также среди достоинств вибродиагностического метода стоит упомянуть малое время диагностирования.

Метод вибрационной диагностики основан на получении данных о вибрации. Любая вибрация содержит в себе гармоники различной частоты. Анализируя амплитуду этих гармоник, можно получить информацию о состоянии оборудования. Данные о вибрации собираются с помощью специального щупа, с помощью датчиков, закрепленных на оборудовании, и т. д. – разные приборы используют разные методы получения данных.

### Постановка задачи

Для повышения ресурса и надежности оборудования, сокращения затрат, связанных с ремонтом и простоями, необходима точная система диагностирования текущего технического состояния.

Вибродиагностирование электрических машин позволяет вовремя выявить развивающиеся дефекты, которые в будущем могут привести к аварийному выходу из рабочего состояния. Точность определения дефекта зависит от ряда факторов, среди которых имеют место следующие ошибки [2]:

– пропуск дефекта, т. е. в электрической машине имеется дефект, но специалист по диагностированию не умеет его выявлять;

– исправная электрическая машина бракуется специалистом по вибродиагностированию.

Указанные выше ошибки обусловлены различными причинами, некоторые из которых рассмотрены в данной статье.

Решение задачи.

Выбор метода диагностирования.

Одной из главных проблем проведения вибродиагностики электрооборудования является выбор метода оценки технического состояния.

Различие методов оценки технического состояния рассмотрим на примере диагностирования самых распространенных элементов любого роторного механизма, подшипников качения. 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.

В настоящее время на практике используются четыре метода оценки технического состояния подшипников качения:

- 1) метод ПИК-фактора;
- 2) метод спектра огибающей;
- 3) метод ударных импульсов;
- 4) метод прямого спектра.

Рассмотрим подробнее каждый из этих методов.

**1. Метод ПИК-фактора [3].** Для контроля технического состояния подшипников по данному методу необходимо определять два параметра вибросигнала:

– среднее квадратическое значение уровня вибрации, т. е. энергию вибрации  $x_e$ :

$$x_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (1)$$

где  $x_i$  – колеблющаяся величина;  $n$  – рассматриваемый интервал времени;

– пиковую амплитуду вибрации  $x_p$ .

Отношение двух этих параметров называется пикфактором и определяется по формуле

$$k_{\text{пф}} = \frac{x_p}{x_e}. \quad (2)$$

*Достоинство* – простота. По данному методу можно определить зарождающиеся дефекты. *Недостатки* – слабая помехозащищенность метода и необходимость про-

водить многократные измерения в процессе эксплуатации. Неопределенность при выявлении дефекта. Так как при развитии дефекта уровень так называемого белого шума может возрасти и как следствие может возрасти среднее квадратическое значение уровня вибрации, а амплитуда при этом увеличивается незначительно, метод искажает реальное состояние диагностируемого механизма.

**2. Метод спектра огибающей [4].** Спектральный анализ огибающей применяется для анализа медленных изменений мощности относительно быстрых процессов. Применительно к вибрационной диагностике можно говорить об анализе свойств сил трений и ударных импульсов, представляющих собой нестационарные процессы. Подшипник рассматривается как механический генератор гармонических колебаний.

Обработка вибросигналов производится следующим образом. При помощи полосового фильтра высокочастотной случайной вибрации (шума) из всего сигнала выделяется узкий диапазон частот (третьоктавный фильтр). При этом выбор нужной полосы частот определяется непосредственно лицом, производящим обработку вибросигнала, что затрудняет работу даже специалисту средней квалификации, не говоря уже о начинающих. Соотношение частот между третьоктавными полосами отвечает уравнению

$$f_x = f_{cp} \cdot \sqrt[3]{2}, \quad (3)$$

где  $f_{cp}$  – средняя гармоническая частота.

Далее строится огибающая сигнала и по наличию гармонических сигналов регистрируется факт присутствия дефектов в механизме. Величина дефектов определяется по глубине модуляции:

$$m = \sqrt{(10^{\Delta L/10} - 1) \frac{\Delta f_A}{\Delta f_\phi}}, \quad (4)$$

где  $\Delta f_A$  – ширина полосы спектра огибающей;  $\Delta f_\phi$  – ширина полосы фильтра, выделяющего высокочастотную вибрацию;  $\Delta L$  – разность уровней гармонической и случайной составляющих спектра вибрации.

Важно четко понимать то, что полученный спектр огибающей строится не по всему сигналу, а только по его узкополосной выборке. Поэтому амплитуды гармоник приводятся не в точном значении виброускорения, а в единицах относительной модуляции сигнала. Это существенно усложняет интерпретацию результатов диагностики.

Рассмотрим виброакустические характеристики двигателя [6].

При неправильном выборе полосы частот можно сделать неверное заключение о состоянии механизма. Так, например, при выборе полосы на частоте 315 Гц (рис. 1), мы попадаем на резонансную частоту работы двигателя. На данной частоте возможен пропуск существующего дефекта. Увеличение вибрации на частоте 2500 Гц, вызванное загрязнением смазки, можно определить как ложный дефект.

Кроме того, в процессе развития дефекта возможно увеличение среднеквадратического уровня вибрации, а значит происходит уменьшение разности уровней гармонической и случайной величины, что приводит к ошибке заключения о состоянии механизма.

*Достоинства* – высокая чувствительность. *Недостатки* – высокая стоимость, необходим анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации. При применении данного метода от пользователя требу-

ется глубокое знание физики работы диагностируемого объекта и хорошие навыки по применению данного метода. Достоверность диагностирования с применением метода огибающей колеблется в пределах 60 %. Это обусловлено тем, что, во-первых, достоверность выявления дефекта зависит от удачного выбора полосы третьооктавного фильтра, а во-вторых, коэффициент модуляции не в полной мере отражает опасность дефекта.

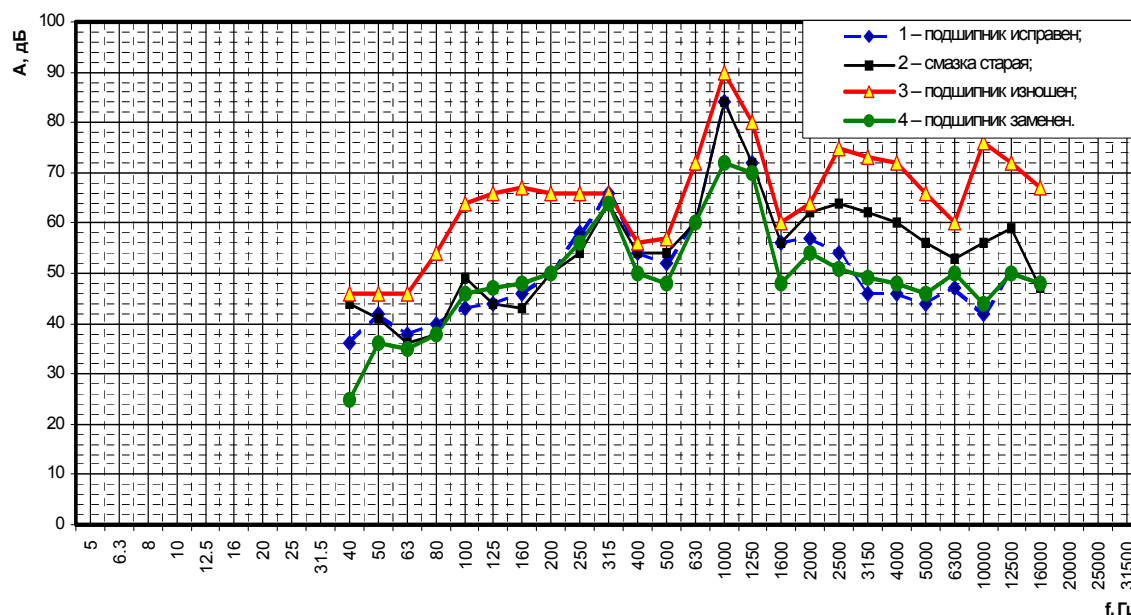


Рис. 1. Виброакустические характеристики двигателя.

**3. Метод ударных импульсов [5].** Метод ударных импульсов основан на измерении и регистрации механических ударных волн, вызванных столкновением двух тел. Ускорение частиц материала в точке удара вызывает волну сжатия, которая распространяется 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 затухающие колебания в датчике (преобразователе).

Пиковое значение амплитуды этого затухающего колебания прямо пропорционально скорости удара. Поскольку затухающий переходный процесс очень хорошо определяется и имеет постоянную величину затухания, его можно отфильтровать от других сигналов, т. е. от сигналов вибрации. Анализ затухающего переходного процесса — основа метода ударных импульсов.

Подшипниковые узлы от соударения дефектов «звонят» на своей частоте. Частота эта практически всегда лежит в диапазоне 28–32 кГц. Это уровень частот акустической эмиссии. Эти колебания очень быстро затухают, поэтому на осциллограммах они выглядят практически как импульсы, что и дало название методу — метод ударных импульсов.

Результаты измерений очень легко нормировать по скорости соударения, зная геометрию подшипника и его обороты. Амплитуды ударных импульсов однозначно связаны со скоростью соударения дефектов и глубиной дефектов. Поэтому по амплитудам ударных импульсов можно достоверно диагностировать наличие и глубину дефектов, но нельзя классифицировать дефект.

*Достоинства* – метод прост и дешев в реализации, существуют простые портативные приборы. *Недостатки* – большая погрешность в определении конкретных дефектов. Дает общую характеристику состояния оборудования вследствие того, что измерения проводятся в высокочастотном диапазоне, так называемом уровне частот акустической эмиссии. Низкая помехоустойчивость.

**4. Метод прямого спектра [3].** Для контроля за техническим состоянием подшипников по данному методу необходим анализ спектра вибрации в диапазоне 1–5000 Гц и 1–15000 Гц.

Метод базируется на анализе спектра вибрации – выявлении периодичности (частоты) появления амплитудных всплесков. Вибрационный сигнал анализируется узкополосным виброанализатором, и по частотному составу спектра можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника (см. рис. 1). Каждому дефекту на элементах подшипника (тела качения, внутреннее и наружное кольцо, сепаратор), 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.

*Достоинства:*

- высокая помехозащищенность (маловероятно наличие в механизме источников, создающих вибрации на тех же частотах, что и дефекты подшипника);
- высокая информативность метода. Возможна оценка состояния элементов подшипника (тел качения, внутреннего и наружного кольца, сепаратора), поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре;
- возможно прогнозирования остаточного ресурса по каждому дефекту (элементу) подшипника при правильном выборе предельных значений.

*Недостатки:* для достоверности диагностирования по данному методу необходимо правильное определение информативных частот и предельных значений вибрации механизмов. Также необходимо верно определять места установки датчика.

Метод используется достаточно широко и дает хорошие результаты. Этот метод может быть использован при создании экспертных систем вибродиагностирования.

#### **Выбор средства диагностирования**

Кроме разных методов диагностирования, существуют различные средства измерения вибрации, от выбора которых зависит точность и возможность диагностирования того или иного дефекта.

Использование современных технологий связи дает возможность создавать системы, позволяющие получать информацию одновременно со значительного количества датчиков, оперативно обрабатывать ее и предоставлять оператору.

Сравнение различных способов измерения виброакустических характеристик рассмотрим на примере двух приборов: простейшего виброанализатора «ЯНТАРЬ» и современного прибора «МСД-10» на основе ноутбука.

Виброизмерительный прибор «ЯНТАРЬ» предназначен для измерения вибрации при контроле, мониторинге, анализе и вибрационной диагностике технического состояния роторных агрегатов и других механизмов с вращающимися элементами.

Прибор «ЯНТАРЬ» позволяют производить измерение виброускорения, вибро-скорости, виброперемещения в заданной полосе частот по общему уровню от 10 до 1000 Гц. Однако порой для выявления дефектов в электрических машинах этого диапазона частот не достаточно. Для более глубокого анализа состояния электрической машины необходимо иметь подробные данные состояния ее частей. Такие данные возможно получить благодаря современным приборам, таким, например, как прибор «МСД-2010».

Многофункциональный сборщик данных «МСД-2010» предназначен для аналого-цифрового преобразования выходных сигналов датчиков, которые представляют собой электрический заряд, напряжение или ток, временного сохранения полученных данных в буферном ОЗУ и передачи их в ПЭВМ для дальнейшей обработки.

Прибор «МСД-2010» является высокотехнологичным продуктом, имеющим высокие характеристики работы и позволяющим осуществлять удобный сбор данных, качественную и быструю обработку результатов и вывод их в доступном для пользователя виде.

Произведем сравнительный анализ двух приборов, «ЯНТАРЬ» и «МСД-2010», на примере простейшего эксперимента с двигателем.

Приборами измерялись значения виброскорости  $V$  и виброускорения  $A$ :

- на холостом ходу (ХХ): в полнофазном режиме работы двигателя и при обрыве фазы;
- под нагрузкой: в полнофазном режиме работы двигателя и при обрыве фазы.

Таблица 1

**Результаты измерения основных параметров вибрации прибором «ЯНТАРЬ» по общему уровню**

Режим работы	$V$ , мм/с	$A$ , м/с <sup>2</sup>
ХХ	0,1352	0,0236
Обрыв фазы на ХХ	0,1491	0,0272
Под нагрузкой	0,1395	0,0265
Обрыв фазы под нагрузкой	0,1519	0,0298

Как видно из эксперимента, отклонение показаний прибора «ЯНТАРЬ» при появлении неисправности незначительно и не несет необходимой информативности. Значит, выявление такого дефекта, как обрыв фазы в двигателе, по общему уровню невозможно. К тому же, как показывает практика, многие дефекты наблюдаются на частотах, заходящих за область от 10 до 1000 Гц.

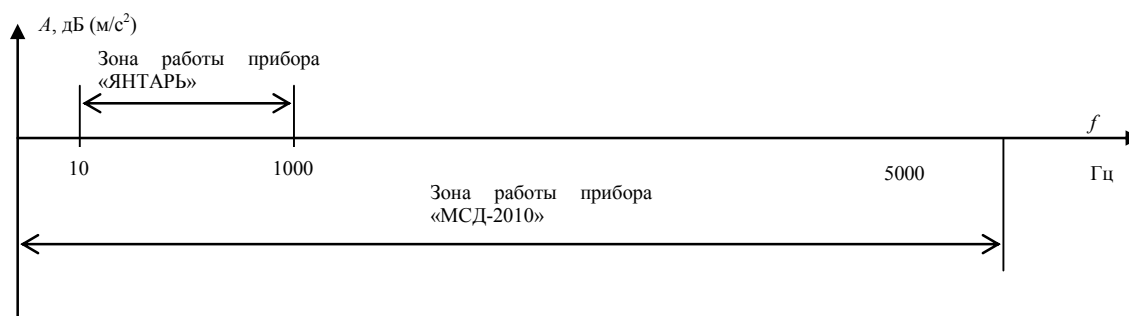


Рис. 2. Сравнение диапазонов работы приборов «ЯНТАРЬ» и «МСД-10»

Как видно из рис. 2, частотный диапазон прибора «МСД-10» гораздо больше, чем у прибора «ЯНТАРЬ». Кроме того, прибор «МСД-10» позволяет анализировать спектр вибрации механизма, что помогает специалисту выявлять дефекты, которые не способны выявить простейшие виброанализаторы, такие как «ЯНТАРЬ». Например, обрыв фазы, производимый в эксперименте. Рассмотрим спектры амплитуд вибрации двигателя, полученные при помощи прибора «МСД-10».

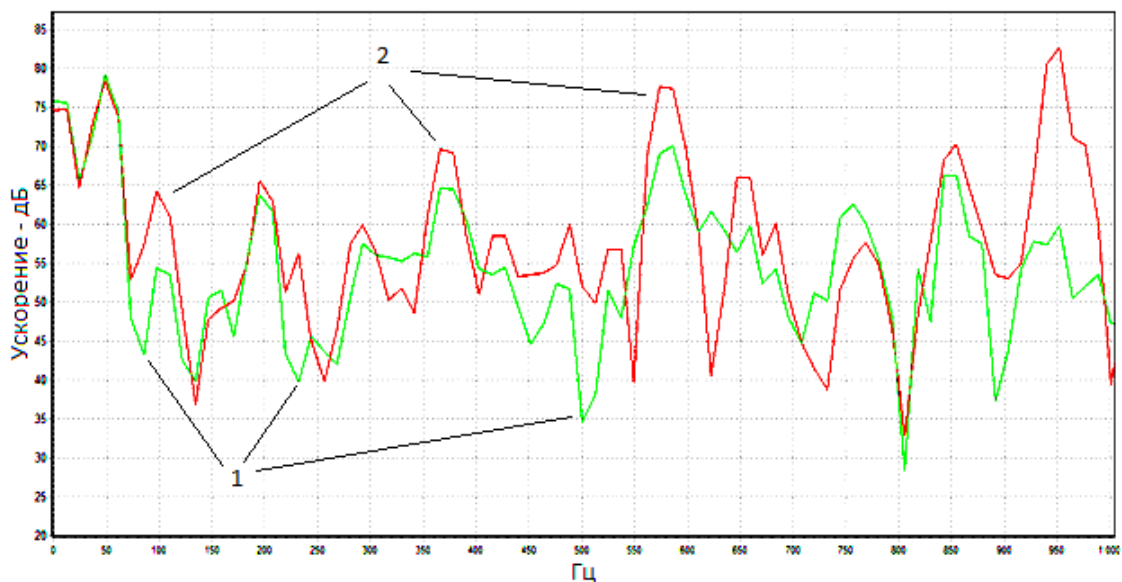


Рис. 3. Спектр амплитуд вибрации двигателя (1 – при работе на холостом ходу; 2 – обрыв фазы при работе на холостом ходу)

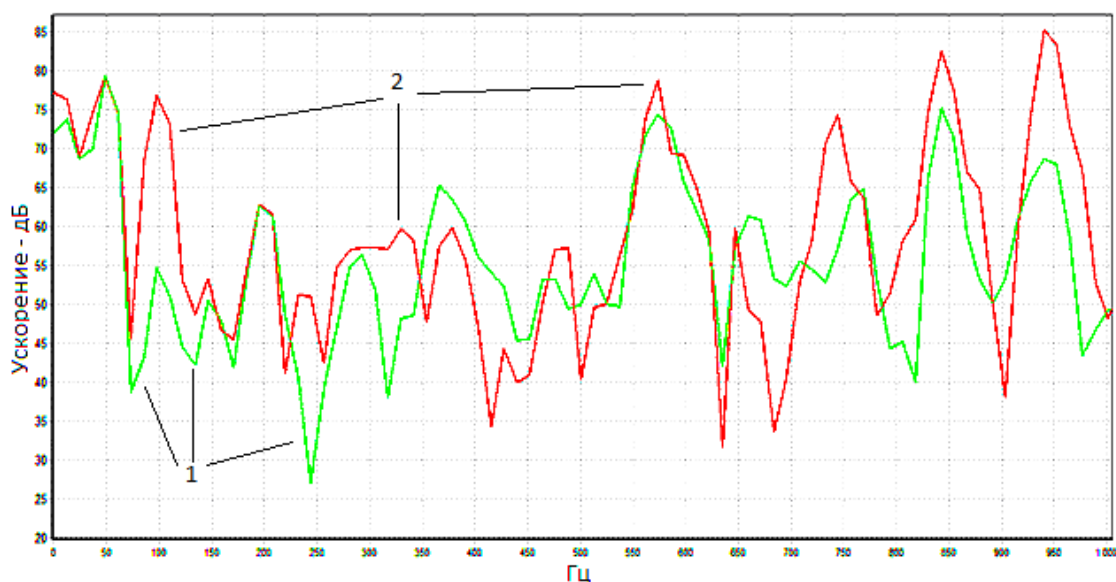


Рис. 4. Спектр амплитуд вибрации двигателя (1 – при работе под нагрузкой; 2 – обрыв фазы при работе под нагрузкой)

Из теории электрических машин магнитная несимметрия в двигателях наблюдается на частоте 100 Гц. Как видно из рис. 3 и 4, на частоте 100 Гц прибором «МСД-10» зарегистрировано значительное увеличение уровня вибрации при вводе дефекта, которое выходит за граничные значения. Следовательно, при вибродиагностике необ-

ходимо осуществлять верный выбор средства измерения вибрации, от которого зависит точность и возможность диагностирования того или иного дефекта.

**Выбор математической модели для расчета информативных частот**

Еще одной неотъемлемой частью эффективного проведения вибродиагностирования оборудования является правильное определение информативных частот, на которых проявляется тот или иной дефект электрической машины. В различных источниках приводят разные формулы для определения этих частот и, соответственно, получают различия их значений.

Рассмотрим определение информативных частот на примере подшипника качения 308.

Исходные данные:  $d = 40$ ;  $D = 90$ ;  $z_{ш} = 8$ ;  $r_{ш} = 7,54$ ;  $R_{вн} = 24,96$ .

Таблица 2

**Вычисление информативных частот вибрации при различных дефектах подшипников качения на основе математических моделей [3], [4]**

Дефекты	Информативные частоты			
	На основе математических моделей			
	Грунтович	Гц	Барков	Гц
Сепаратор	$\frac{f_p \cdot R_{вн}}{2(R_{вн} + r_{ш})}$	9,6	$\frac{1}{2} f_{вп} (1 - \frac{d_{тк}}{d_c} \cos \alpha)$	9,9
Неравномерность зазора	$\frac{f_p \cdot R_{вн}}{2(R_{вн} + r_{ш})} z_{ш}$	76,8	$f_c \cdot z_{ш}$	79,2
Поверхность тел качения	$\frac{f_p \cdot R_{вн}}{2 \cdot r_{ш}}$	41,38	$\frac{f_p \cdot R_{вн}}{2 \cdot r_{ш}}$	41,38
Внутреннее кольцо	$(f_p - f_c) z_{ш}$	123,2	$(f_p - f_c) z_{ш}$	123,2

Таблица 3

**Вычисление информативных частот вибрации при различных дефектах подшипников качения на основе приближенных методов [3], [7]**

Дефекты	Информативные частоты			
	Приближенные методы			
	Русов	Гц	Грунтович, Петров	Гц
Сепаратор	$\left( \frac{1}{2} - \frac{1,2}{z_{ш}} \right)$	0,35	$K_c \cdot f_p$	9,5
Неравномерность зазора	$F_1 \left( \frac{z_{ш}}{2} - 1,2 \right)$	140	$K_{нз} \cdot f_p$	77,5
Поверхность тел качения	$\left( \frac{z_{ш}}{2} + \frac{1,2}{z_{ш}} \right)$	4,15	$K_{тк} \cdot f_p$	41,25
Внутреннее кольцо	$F_1 \left( \frac{z_{ш}}{2} + \frac{1,2}{z_{ш}} \right)$	207,5	$K_{вк} \cdot f_p$	122,5

Как видно из табл. 2 и 3, в методе Русова В. А. допущен ряд ошибок по вычислению информативных частот, вызванный скорее всего опечаткой редакции книги [7],



что для опытного специалиста сразу бросается в глаза. Однако работнику с недостаточным опытом и знаниями трудно заметить несоответствие значений информативных частот реальной физике работы механизма, что может привести к ошибочному заключению о состоянии оборудования.

### **Заключение**

1. Специалист по вибродиагностике должен уметь верно использовать существующие методы и средства диагностирования, уметь качественно обрабатывать сигналы вибрации и выдавать на основе результатов измерения правильное заключение о техническом состоянии объекта диагностирования.

2. Для постановки правильного заключения специалист должен знать физические процессы, происходящие в объектах диагностирования.

3. Для повышения эффективности диагностики при ее практическом использовании специалисту важно знать, что диагностика проводится в условиях неполноты и неопределенности информации.

### **Литература**

1. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М. : Библиогр., 1996. – 276 с.
2. Денисюк, Ю. Ю. Вибродиагностирование электрических машин в условиях помех и неопределенностей / Ю. Ю. Денисюк // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – № 3. – 2011.
3. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования: учеб. пособие / Н. В. Грунтович. – Минск : Новое издание ; М. : ИНФА-М, 2013. – 271 с. : ил. – (Высш. образование: Бакалавриат).
4. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев // Рекомендации для пользователей систем мониторинга и диагностики АО ВАСТ и Inteltech Enterprises, Inc. – СПб., 1997.
5. Вибродиагностика / Г. Ш. Розенберг [и др.]. – СПб., 2003.
6. Грунтович, Н. В. Техническое диагностирование элементов атомной энергетической установки : в 2 ч. / Н. В. Грунтович. – Севастополь, 1984. – Ч. I. Методика прогнозирования технического состояния корабельных электрических машин и насосов. – 92 с.
7. Русов, В. А. Спектральная вибродиагностика / В. А. Русов // Производ.-внедренч. фирма «Вибро-центр». – Пермь, 1996.

*Получено 06.03.2014 г.*