

ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Ю. Ю. ДЕНИСЮК

*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 диагностики является выявление и предупреждение отказов и неисправностей, поддержание эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование состояния в целях полного использования доремонтного и межремонтного ресурса.

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

Вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования позволяют:

- уточнить причины дефекта и условия его возникновения и развития, оценить влияющие факторы;
- вовремя устранить дефект или увеличить среднюю наработку парка на проявление дефекта (отказа);
- снизить интенсивность проявления дефекта (отказа) при наиболее ответственных режимах работы и эксплуатации машины;
- улучшить организацию работ по разработке и внедрению мероприятий, направленных на устранение дефекта;
- оценить эффективность мероприятий, направленных на устранение дефекта, и выбрать для внедрения наиболее эффективные;
- получить чисто экономический эффект благодаря снижению затрат на внедрение мероприятий, предотвращающих дефект или устраняющих неисправность, и затрат производства на изготовление деталей;
- оценить возможный эффект от разработанных и внедренных мероприятий на ранней стадии, что очень важно, так как полное проявление действия этих мероприятий зависит от наработки изделия после их внедрения и может быть отделено от момента внедрения длительным временем (1–2 года и более);
- ускорить процесс восстановления эксплуатационной надежности парка машин и управлять им;
- облегчить взаимодействие изготовителя машин и ее заказчика (эксплуатационника) в конфликтных ситуациях, особенно в начальном периоде массового проявления дефектов и организации действия по их устранению.

В то же время использование диагностики может вызвать некоторый отрицательный эффект. Отрицательные эффекты при внедрении системы вибромониторинга на предприятии следующие:

- увеличение досрочных (временных) выводов изделий из эксплуатации;
- неизбежность «необоснованных» съемов изделий с эксплуатации вследствие ложных диагнозов;

- возможность пропуска в дальнейшую эксплуатацию некоторой части ненадежных изделий (особенно на начальном этапе использования диагностики);
- вероятность чисто экономической неэффективности внедрения диагностики (например, при малом количестве эксплуатируемых изделий);
- необходимость проведения сложных и трудоемких исследований для разработки методик и средств диагностирования конкретных дефектов.

Данные отрицательные факторы, снижающие эффективность диагностики, обусловлены следующими причинами:

- обычно встречающимся на практике неполным представлением о дефекте, его причинах, условиях возникновения и факторах, влияющих на его появление и развитие, а также началом разработки методик диагностики конкретного объекта по конкретному дефекту при неполном представлении о дефекте в целях сокращения сроков обеспечения надежности парка оборудования;
- необходимостью диагностирования по параметрам, являющимся лишь частью комплекса факторов, связанных с дефектом, а также технической невозможностью проведения исследований для разработки методик диагностирования в объеме, дающем полную информацию;
- необходимостью принятия компромиссных решений при установлении границ (норм) в условиях недостаточно четкой и полной оценки альтернативных факторов, а также недостаточно полной информацией о возможных альтернативах и их последствиях (особенно это относится к информации интуитивного характера), выдаваемой при постановке задачи диагностики и подготовке решений лицами, ставящими задачу и принимающими решение.

Постановка задач

Вибродиагностика, являясь разделом технической диагностики, есть отрасль знаний, включающая в себя теорию и методы организации процессов распознавания технических состояний машин и механизмов по исходной информации, содержащейся в виброакустическом сигнале.

Основным физическим носителем информации о состоянии элементов работающего оборудования в вибродиагностике является виброакустический сигнал – собирательное понятие, включающее информацию о колебательных процессах (вибрационных, гидро- или газодинамических и др.) и акустическом шуме механизма в окружающей среде. Следовательно вибродиагностированию может подвергаться любое оборудование, функционирование которого сопровождается возбуждением колебательных процессов.

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:

- *ошибка первого рода*: пропуск дефекта, т. е. в электрической машине имеется дефект, но специалист по диагностированию не умеет его выявить;
- *ошибка второго рода*: исправная электрическая машина бракуется специалистом по вибродиагностированию.

Указанные выше ошибки обусловлены следующими причинами:

- неопределенности в процессе диагностирования;
- помехи в процессе диагностирования;
- погрешности, возникающие в процессе диагностирования.

Решение задач

Неопределенности в процессе диагностирования обусловлены следующими причинами:

1. Отсутствие информации о подшипниках качения. При отсутствии информации о подшипниках качения, по которым определяются информативные частоты, допускается приблизительно вычислять значение информативных параметров вибрации.

Оценим абсолютную погрешность приближенного определения информативных частот для 20 типов подшипников. Для этого рассчитаем следующие информативные

частоты: частоту вращения сепаратора подшипника (f_{01}); частоту, на которой проявляется дефект увеличения зазора между телами качения и кольцами подшипника (f_2); частоту, на которой проявляется дефект износа поверхности тел качения, сепаратора и старения смазки (f_5); частоту, на которой проявляется дефект износа поверхности тел качения и внутреннего кольца ($f_5 - f_p$). Перечисленные выше частоты рассчитаем сначала по точным формулам, а затем по приближенным.

Приведем формулы для точного расчета информативных частот для указанных дефектов:

- Частота вращения сепаратора подшипника [2]:

$$f_{01} = \frac{f_p \cdot R_{\text{вн}}}{2(R_{\text{вн}} + r_{\text{ш}})}, \quad (1)$$

где f_p – частота вращения ротора электрической машины; $R_{\text{вн}}$ – радиус внутренней поверхности, по которой перемещается тело качения:

$$R_{\text{вн}} = \frac{d + D}{4} - r_{\text{ш}}, \quad (2)$$

d – диаметр внутреннего кольца; D – диаметр наружного кольца; $r_{\text{ш}}$ – радиус тел качения.

- Частота, на которой проявляется дефект увеличения зазора между телами качения и кольцами подшипника [2]:

$$f_2 = \frac{f_p \cdot R_{\text{вн}} \cdot Z_{\text{ш}}}{2(R_{\text{вн}} + r_{\text{ш}})}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{ш}}$ – число тел качения.

С частотой f_2 происходит опрокидывание вала двигателя на подшипниках качения.

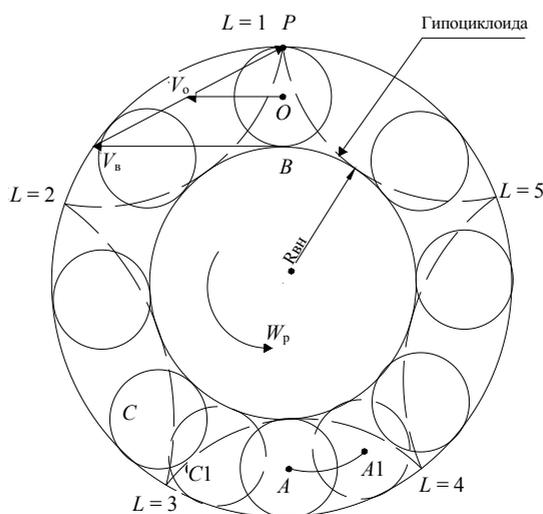


Рис. 1. К определению частоты вращения сепаратора

Положение вала и тел качения, когда центр вала совпадает с центром тела качения (позиция A) является не устойчивым. Так как вал вращается, то перемещаются и тела качения. При перемещении шарика с позиции A в A1 происходит опрокидывание вала на тело качения C (C1). Чем больше зазор между поверхностью тела качения и кольцами, тем больше скорость удара вала по шарикам в подшипнике:

$$\vartheta = h \sqrt{\frac{F}{R_{\text{вн}} + r_{\text{ш}}}} \sin\left(\frac{\pi}{Z_{\text{ш}}}\right), \quad (4)$$

где F – сила, действующая в точке наружной обоймы и тел качения.

Уровень вибрации на частоте f_2 пропорционален величине радиального зазора в подшипнике.

• Частота, на которой проявляется дефект износа поверхности тел качения, сепаратора и старения смазки [2]:

$$f_5 = \frac{f_p \cdot R_{\text{вн}}}{2 \cdot r_{\text{ш}}}. \quad (5)$$

Для приближенного расчета необходимо вычислить переводной коэффициент для каждого подшипника на каждой информативной частоте:

$$K_1 = \frac{f_{01}}{f_{06}}, \quad (6)$$

где f_{06} – оборотная частота вала двигателя.

Тогда для вычисления информативных частот получаем:

$$f_{01}^I = K_1 \cdot f_{06}; \quad (7)$$

$$f_2^I = K_1 \cdot f_{06} \cdot Z_{\text{ш}}, \quad (8)$$

где f_{01}^I – приближенное значение частоты вращения сепаратора подшипника; f_2^I – приближенное значение частоты, на которой проявляется дефект увеличения зазора между телами качения и кольцами подшипника.

Приведем пример расчета приближенных значений информативных частот для подшипника № 210:

$$K_1 = \frac{20,46}{50} = 0,4;$$

$$f_{01}^I = 0,4 \cdot 50 = 20 \text{ Гц.}$$

Результаты расчета для остальных подшипников аналогичны и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Точные и приближенные значения информативных частот подшипников качения, при частоте вращения ротора 3000 об/мин

Номер подшипника качения	Вид расчета	f_{01} , Гц	f_2 , Гц	f_5 , Гц	$f_p - f_0$, Гц	$f_5 - f_p$, Гц
210	точный	20,46	204,6	112,79	29,5	62,79
	приближенный	20	205	113	30	63

Номер подшипника качения	Вид расчета	f_{01} , Гц	f_2 , Гц	f_5 , Гц	$f_p - f_0$, Гц	$f_5 - f_p$, Гц
304	точный	18,38	128,6	69,53	31,6	19,53
	приближенный	20	130	70	30	20
305	точный	18,39	128,7	69,56	31,6	19,5
	приближенный	20	130	70	30	20
306	точный	18,97	151,76	78,65	31	28,65
	приближенный	20	150	80	30	30
307	точный	18,78	131,46	75,57	31,2	25,57
	приближенный	20	130	75	30	25
308	точный	19,2	153,6	82,75	30,8	32,75
	приближенный	20	155	83	30	33
7A309	точный	18,97	151,8	78,8	31,03	28,8
	приближенный	20	150	80	30	30
7A310	точный	19,04	152,3	79,9	30,96	29,9
	приближенный	20	150	80	30	30
312	точный	19,12	152,9	81,34	30,8	31,3
	приближенный	20	155	80	30	30
7A313	точный	19,19	153,5	82,6	30,8	32,6
	приближенный	20	155	85	30	35
314	точный	19,2	153,8	83,26	30,78	33,2
	приближенный	20	155	85	30	35
7A315	точный	19,25	154	83,8	30,7	33,8
	приближенный	20	155	85	30	35
7A317	точный	19,02	152,17	84,8	30,9	34,8
	приближенный	20	150	85	30	35
7A320	точный	19,2	153,6	82,8	30,8	32,8
	приближенный	20	155	85	30	35
4A176309	точный	18,97	208,8	78,8	31	28,8
	приближенный	20	210	80	30	30
309	точный	18,97	132,7	78,8	31	28,8
	приближенный	20	135	80	30	30
4A176310	точный	19,04	209,4	79,9	30,9	29,9
	приближенный	20	210	80	30	30
A346310	точный	19,04	209,4	79,9	30,9	29,9
	приближенный	20	210	80	30	30
8A346320	точный	19,2	230,4	82,8	30,8	32,82
	приближенный	20	230	85	30	35
B366322	точный	19,1	210	80,9	30,9	30,98
	приближенный	20	210	80	30	30

В табл. 1 рассчитаны информативные частоты для 20 типов подшипников качения [4]: верхнее значение соответствует точному расчету; нижнее значение соответствует приближенному расчету. Из приведенного расчета можно оценить абсолютную

погрешность приблизительной оценки информативных параметров вибрации на каждой отдельно взятой частоте.

Результаты оценки абсолютной погрешности приближенного определения информативных частот сведем в табл. 2.

Таблица 2

Значения абсолютной погрешности при приближенном определении информативных частот

Информативная частота	f_{01} , Гц	f_2 , Гц	f_5 , Гц	$f_p - f_0$, Гц	$f_5 - f_p$, Гц
Значение средней абсолютной погрешности, Гц	-0,93	-0,32	-0,69	1	-0,69

Из табл. 2 видно, что абсолютная погрешность приближенного определения информативных частот не превышает допустимое отклонение, равное ± 4 Гц. Так как допустимая абсолютная погрешность приближенного определения информативных частот вибрации равна ± 4 Гц, то прибор для измерения вибрации должен иметь шаг измерения равный 8 Гц.

2. Отсутствие статистических данных о динамике износа. Для решения данной задачи необходимо иметь четкое представление о физике работы подшипника качения. При работе подшипника качения шарик совершает три вида движения, а именно: вращение, скольжение и качение [2]. В то же время траекторией движения каждой точки шарика является гипоциклоида, которая показана на рис. 1. Характеристикой гипоциклоиды является кратность гипоциклоиды, которая определяется следующим образом:

$$K_p = \frac{L_{нар}}{L_{ш}}, \quad (9)$$

где $L_{нар}$ – длина окружности наружного кольца подшипника, которая определяется как:

$$L_{нар} = 2 \cdot \pi \cdot r_{нар}; \quad (10)$$

$L_{ш}$ – длина окружности шарика, которая определяется как:

$$L_{ш} = 2 \cdot \pi \cdot r_{ш}. \quad (11)$$

В результате подстановки формул (10) и (11) в формулу (9) получаем:

$$K_p = \frac{r_{нар}}{r_{ш}}. \quad (12)$$

Вероятность того, что кратность гипоциклоиды окажется целым числом, бесконечно мала, отсюда следует, что вероятность соприкосновения шарика с поверхностью наружного кольца в одной и той же точке также бесконечно мала. Поэтому решать проблему отсутствия статистических данных о динамике износа можно следующим образом: при измерении вибрации в конкретной реперной точке определяется усредненное значение вибрации по 4–8 значениям. Далее, не перемещая датчик, проводится 3–4 измерения спектра вибрации в этой точке. Если имеется износ каких-либо узлов подшипника, то на соответствующих частотах вибрации, на основании измерений, проявится резкий скачок уровня вибрации. Чем больше эта разница, тем большим будет износ подшипника.

3. Сложностью определения предельных значений параметров вибрации для каждого механизма. Решение этой задачи производится несколькими способами:

- 1) принять за основу рекомендации международных и государственных стандартов;
- 2) принять в качестве граничных значений рекомендации зарубежных или отечественных ученых;
- 3) в качестве граничных значений можно принимать огибающие верхних и нижних значений амплитуд вибрации на информативных частотах.

При построении верхних граничных значений вибрации электрической машины руководствуются следующей методикой:

- 1) определяются информативные частоты для типовых дефектов;
- 2) назначается выборка диагностируемого оборудования в количестве 10–15 единиц, находящегося длительное время в эксплуатации до ремонта;
- 3) на каждой информативной частоте вибрации электрической машины данной выборки выбирается максимальное значение амплитуды.
- 4) полученные точечные данные на информативных частотах соединяются ломаной линией, которая и будет представлять графическое изображение верхних граничных значений виброакустической характеристики диагностируемого оборудования.

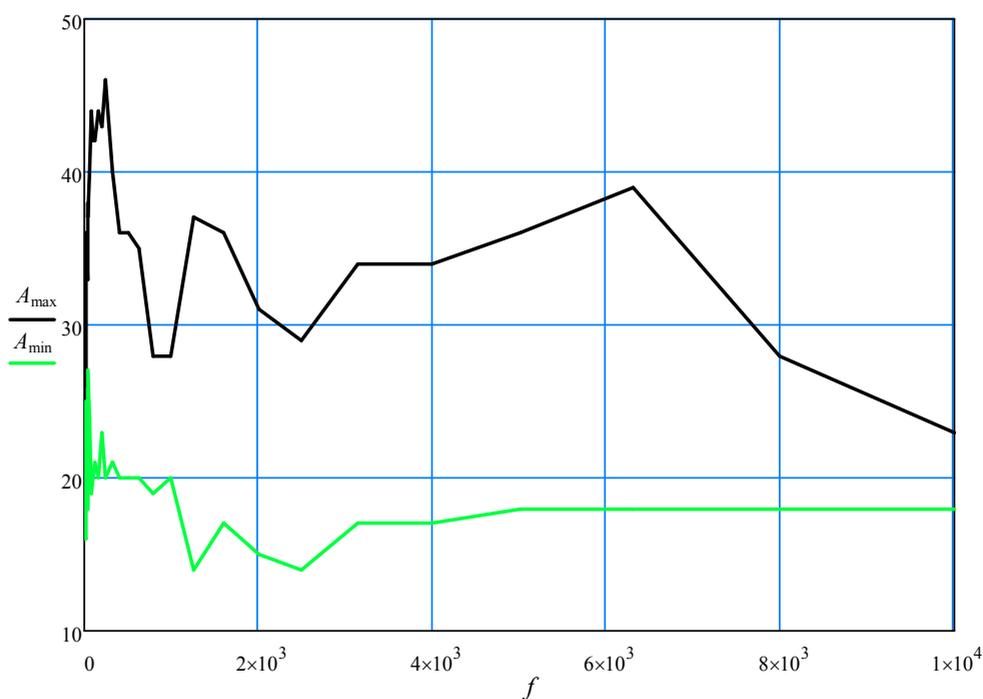


Рис. 2. К определению верхних и нижних граничных значений вибрации

В результате получаем виброакустическую характеристику условного механизма, содержащего все типовые дефекты данного типа оборудования.

Полученные граничные значения можно сравнить с международными или государственными стандартами. Если эти цифры оказались больше стандартных, то выборка механизмов для построения верхних граничных значений принята правильно, в противном случае в выборке оказались механизмы с хорошим техническим состоянием.

Аналогичным образом определяют нижнее граничное значение вибрации, только в данном случае на каждой информативной частоте из заданной выборки выбирают минимальные значения амплитуды вибрации.

В результате получаем виброакустическую характеристику идеального условного механизма, не содержащего ни одного типового дефекта. Имея виброакустическую характеристику диагностирования механизма, эти две характеристики позволяют успешно оценивать техническое состояние нового механизма, а также прогнозировать и вычислять остаточный ресурс.

Помехи в процессе диагностирования

Рассмотрим помехи и способы уменьшения влияния этих помех на точность диагностирования.

1. **Несинусоидальность напряжения в сети:** несимметрия фазного напряжения до 3 % вызывает увеличение вибрации на 8–12 дБ на частотах f_1 , $2f_1$ и $4f_1$. Поэтому перед началом измерения целесообразно проверить качество фазного напряжения.

2. **Работающие рядом механизмы** при условии, что дискретные частоты вибрации подшипников качения исследуемого объекта и механизма – помехи одинаковы. Предварительно измеряется амплитудный и частотный спектр помехи на неработающем механизме, который диагностируется. Если уровень вибрации помехи на информативных частотах диагностируемого объекта по эталонной характеристике меньше на 6–10 дБ, то влияние сигнала (по предыдущему замеру) помехи не учитывается. Если уровень сигнала помехи на диагностируемых частотах равен полезному сигналу, то возможны два решения: остановить механизм-помеху на время диагностирования или учесть величину приращения полезного сигнала под влиянием помехи согласно графику:

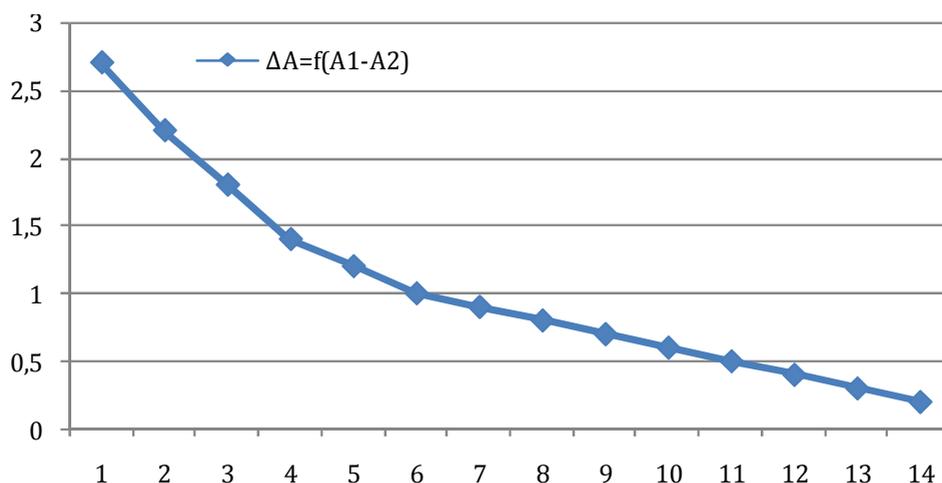


Рис. 3. К определению уровня вибрации с учетом помех

Если существует два акустических источника, уровни вибрации которых в какой-то точке акустического поля соответственно равны A_1 и A_2 , причем $A_1 \gg A_2$, то результирующий уровень A в той же точке равен:

$$A = A_1 - \Delta A. \quad (13)$$

Величина ΔA определяется из рис. 3 в функции $A_1 - \Delta A$.

При проведении диагностирования следует понимать, что, если мы диагностируем электрическую машину, то в качестве помехи будут выступать рядом работающие механизмы; если же мы диагностируем работающие механизмы, то в качестве помехи будет выступать уже электрическая машина.

3. **Положение датчиков на лапе, корпусе и подшипниковых щитах.** Датчик, закрепленный на окрашенной поверхности лапы, а потом – непосредственно на металлической поверхности, регистрирует различный уровень вибрации. Место установки датчика следует выбирать в зависимости от решаемой задачи.

Погрешности, возникающие в процессе диагностирования

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 [1].

Заключение

1. Специалист должен знать физические процессы, происходящие в объектах диагностирования.

2. Специалист должен уметь проводить измерения сигналов вибрации и работать с виброизмерительными приборами. А также при наличии помех и неопределенностей мог применить описанные выше методики для исключения причин, оказывающих влияние на точность результата диагностирования.

3. Для повышения эффективности диагностики при ее практическом использовании важно, чтобы лица, принимающие решения и ставящие задачи диагностики, ясно понимали тот факт, что диагностика проводится в условиях неполноты и неопределенности информации, и поэтому неизбежен компромисс между пропусками дефекта и необоснованными заключениями о неисправности объекта.

4. Специалист должен уметь обрабатывать сигналы вибрации и выдавать на основании результатов измерений правильное заключение о техническом состоянии объекта диагностирования.

Литература

1. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М. : Библиогр., 1996. – 276 с.
2. Грунтович, Н. В. Техническое диагностирование элементов атомной энергетической установки / Н. В. Грунтович. – Севастополь, 1984. – Ч. I. Методика прогнозирования технического состояния корабельных электрических машин и насосов. – 92 с.
3. Вибродиагностика : монография / под ред. Г. Ш. Розенберга. – СПб. : ПЭИПК, 2003. – 284 с.
4. Байзельман, Р. Д. Подшипники качения : справочник / Р. Д. Байзельман, Б. В. Цыпкин, Л. Я. Перель. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 572 с.

Получено 03.03.2011 г.