

УДК 621.822.6

ДЕФЕКТЫ ОПОР КАЧЕНИЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН В СПЕКТРАХ ВИБРОСИГНАЛОВ

В.А. Воронкин, К.А. Павлов
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Рассмотрены практические методы определения рабочего состояния подшипников качения роторных машин с помощью методов спектрального анализа. Приведены примеры определения информативных частот.

Ключевые слова: подшипники качения, диагностика, виброактивность, малошумность.

Переходу судовой электромашин (СЭМ) из исправного состояния в неработоспособное (предельное) способствуют множество факторов. Опыт показывает, что при анализе состояния СЭМ, важнейшими являются эксплуатационные характеристики их подшипниковых узлов (ПУ) [1 – 7].

Наиболее распространенные причины повреждения ПУ СЭМ: деградация, избыток или недостаток смазки, неудовлетворительное качество монтажа ПУ, превышение допустимых нагрузок или температуры ПУ, подшипниковые токи, неправильный выбор и компоновка подшипников. Все вышеперечисленные факторы влияют на текущее состояние ПУ и, соответственно, на возникновение функциональных или акустических отказов СЭМ.

В самом общем случае состояние подшипника качения (ПК) за весь срок его службы можно условно разделить на пять этапов (рис. 1). На рисунке по вертикали отложен уровень вибрации \dot{X} , а по горизонтальной оси отложены условные фазы развития дефектов. Нижняя линия соответствует уровню фона вибрации на каждом этапе развития дефектов, верхняя – уровню пиков вибрации. До начала первого этапа (отметка 1), общее техническое состояние ПК считается исправным. На этом «нулевом» этапе развития дефектов пики вибрации незначительно превышают уровень фона, а сам фон вибрации (в данном случае среднеквадратичное значение (СКЗ) виброскорости) значительно меньше нормируемого значения.

Фаза 1. На отметке 1 в подшипнике фиксируется дефект, возникают ударные импульсы, растущие по величине. Уровень фона вибрации по своей величине при этом остается неизменным, так как дефект носит незначительный характер и общее состояние подшипника работоспособное.

Фаза 2. Энергия ударных импульсов в подшипнике практически максимального значения. Величина пиков на временной реализации уже практически не растет, но и уровень фона тоже меняется мало.

Фаза 3. Зона перехода подшипника в предельное состояние. Растет уровень фона. Это этап начала отказа подшипника.

Фаза 4. Развитие дефекта. Уровень фона вибрации практически сравнялся с уровнем пиков, вся реализация состоит из пиков.

Фаза 5. Этап наступления катастрофического отказа.

Все эти вышеперечисленные этапы ухудшения состояния подшипника свойственны практически всем видам дефектов, имеющих место в любых разновидностях подшипников СЭМ. В зависимости от ряда эксплуатационных параметров подшипников могут лишь наблюдаться различия в длительности этапов и интенсивности процессов в них, но общая картина развития не меняется. Как показали многочисленные эксперименты, узкополосный спектральный анализ оказывается наиболее эффективным для диагностики малошумного оборудования морского исполнения. Для этих машин актуальна задача выявления дефектов на ранней стадии их развития, когда дефект приводит ещё не к функциональному отказу электромашин (ЭМ), а к параметрическому из-за превышения заданных норм вибрации. Для решения этой задачи необходимо, прежде всего, с большой точностью выявить, разделить и идентифицировать вибропризнаки, соответствующие различным дефектам и различным источникам вибрации.

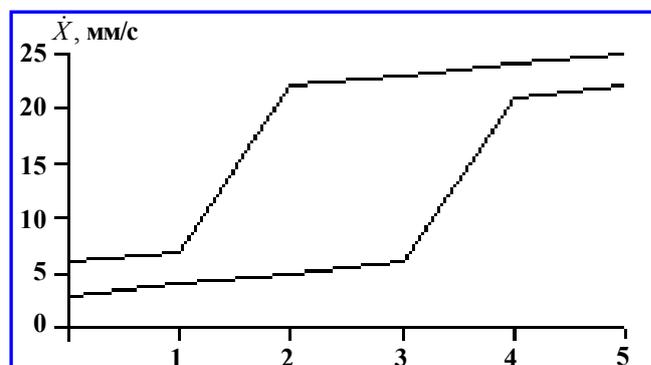


Рис. 1. Динамика состояния ПУ

В основе разделения и идентификации вибропризнаков лежат зависимости между конкретным видом дефекта, соответствующим ему механизмом возникновения вибраций, и характерными для этого механизма вибраций диагностическими признаками. Информативными признаками, характеризующими каждый конкретный вид дефекта, являются частоты дискретных составляющих в спектре, их совокупность и насыщенность ими спектра, а также характер спектра и соотношение между уровнем случайного шума и дискретных составляющих.

Для того чтобы в спектре были достоверно выявлены эти характерные частоты и их гармоники, при измерении необходимо выполнять целый ряд требований:

- подшипник должен быть нагружен усилием, близким к номинальному;
- дефектная зона должна периодически проходить через зону нагрузки подшипника;
- в СЭМ не должно быть других источников вибросигналов с частотой равной частоте от дефектов;
- вибродатчик должен быть расположен достаточно близко к нагруженной зоне подшипника;
- должно быть обеспечено получение спектра вибросигнала с разрешением не меньше 1600 – 3200 линий.

Спектр вибраций, например электронасосов, обычно характеризуется большим числом дискретных составляющих (до 700 дискрет в диапазоне частот до 2000 Гц). Для эффективного разделения вибропризнаков и их надежной идентификации в подобных случаях следует пользоваться узкополосным спектральным анализом со спектральным разрешением порядка 0,1 – 0,01 Гц. Эти требования относятся ко всем методам диагностики подшипников качения по спектрам и спектрам огибающей, которые базируются на использовании формул расчета подшипниковых частот. В противном случае высока вероятность или пропуска дефектов или же ложного определения дефектов там, где их нет.

Дефекты ПК проявляются на частотах, одни из которых связаны с их геометрическими параметрами, а другие являются случайными. Отметим, что вычисленные частоты не всегда точно совпадают с измеренными из-за проскальзывания тел качения и несоответствия между реальным путем движения тел качения и тем диаметром, который использовался в вычислениях. Силы, вызывающие эти вибрации, могут быть по своей природе периодическими, непериодическими или случайными, и чаще всего проявляются на высоких частотах. В связи с тем, что в основу вибродиагностирования производственных и эксплуатационных дефектов

ПУ заложены по сути одни и те же методы, в дальнейшем мы не будем специально останавливаться на их отличиях.

Дефекты ПК чаще всего могут появиться вследствие нарушений правил монтажа подшипниковых узлов. Одним из признаков таких дефектов является присутствие в спектре несинхронных пиков, т. е. пиков, которые не являются целочисленными гармониками частоты вращения. Более того, при развитых дефектах можно наблюдать гармоники этих несинхронных пиков. Спектр может содержать как дискретные (узкополосные) пики, так и размытые пики, в которых сосредоточена вибрационная энергия. Следует подчеркнуть, что амплитуда колебаний, связанных с дефектами ПК, много меньше той, что вызывается другими дефектами ЭМ, например дисбалансом, несоосностью. Указанные дефекты вызывают колебания с амплитудами разных порядков, поэтому целесообразно сравнивать полученные данные с имеющимися эталонными значениями частот для различных дефектов, вместо того, чтобы пользоваться единым общим уровнем. Дефекты внутренней и наружной дорожек качения, дефекты элементов качения, дефекты сепаратора, ослабление посадки ПК, увеличенный радиальный зазор ПК, проворачивание внутреннего кольца ПК на валу, перекос ПК и дефекты смазки возможно распознать с помощью виброанализа. Если тип ПК неизвестен и в связи с этим точно рассчитать значения информативных частот ПК затруднительно, возможно воспользоваться приблизительными формулами. Так, частота вращения сепаратора составляет примерно 40% частоты вращения вала. Частота перекачивания элементов качения по наружному кольцу $f_{нар}$ будет примерно равна 0,4 от произведения числа элементов качения на частоту вращения. Частота перекачивания шариков по внутреннему кольцу $f_{внутр}$ будет примерно 0,6 от произведения числа элементов качения на частоту вращения, т. е. отношение $f_{внутр}/f_{нар}$ составляет около 1,5. Самой высокой характерной частотой является частота перекачивания по внутренней дорожке $f_{внутр}$, которая примерно на 40 – 60% превышает характерную частоту для наружной дорожки, и оба этих пика будут несинхронными.

В большинстве случаев способ использования ПК в СЭМ таков, что внутренняя дорожка вращается, а наружная остается неподвижной. Если дефект находится на внутренней дорожке, он постоянно перемещается вместе с ней и поэтому не всегда находится в зоне нагрузки. Вибрация передается от внутренней дорожки к датчику через эле-

менты качения, сепаратор, наружную дорожку и корпус ПК. Такой путь распространения вибрации связан с затуханием. Добавим к этому, что дефект перемещается и часто находится вне зоны нагрузки, где удары значительно ослабевают. Поэтому необходимо, чтобы выборки сигналов, по которым производится усреднение, были достаточно длинные и охватывали, по крайней мере, несколько полных оборотов вала. В противном случае, может оказаться, что в выборки не будут попадать самые мощные участки сигнала, когда дефект внутренней дорожки проходит зону нагрузки. Понятно, что если в спектре вибрации наблюдаются характерные частоты как для внутренней, так и для наружной дорожки, и обе они имеют одинаковую амплитуду, то внутренняя дорожка наверняка имеет более развитый дефект. Более того, если вы обнаружили дефекты на обеих дорожках, то из этого следует, что дефекты имеются также и на элементах качения. Они могут не всегда проявляться на соответствующих частотах, но могут вызвать появление боковых полос у частот, характерных для дефектов дорожек. Как уже указывалось, если дефект присутствует на внутренней дорожке, в спектре появится составляющая $f_{\text{внутр}}$. Пик на этой частоте для малозначительного дефекта может отсутствовать, однако, дефект можно будет обнаружить вблизи гармоники $k f_{\text{внутр}}$ (номер этой гармоники k будет соответствовать числу элементов качения в ПК). Следовательно, если не предусмотрен сбор информации в этом расширенном диапазоне частот, вы не будете иметь возможность идентифицировать данный дефект на ранней стадии. К примеру, рассмотрим ПК с 19-ю элементами качения. Допустим, что характерная частота обката по внутренней дорожке примерно в 11,42 раза превышает частоту вращения вала. Для малозначительного дефекта трудно выделить эту спектральную составляющую на фоне шума. Но возможно увидеть ее гармоники на более высоких частотах, особенно самую высокую – 19-ю, соответствующую числу элементов качения. Это показывает, что необходимо контролировать вибрацию в частотном диапазоне, верхняя граница которого превышает частоту вращения вала более чем в 200 раз ($11,42 \times 19$). Между тем при исследованиях часто ограничиваются диапазоном частот по 50-ю гармонику частоты вращения. Отсюда следует вывод – малозначительные дефекты могут проявляться лишь на частотах в 16 – 19 раз превышающих расчетные значения характерных частот для внутренней или наружной дорожек.

Для средних дефектов амплитуды гармоник выше, и имеются их заметные пики на более низких частотах. В некоторых случаях возможно появление пиков на 6, 5 и 4-й и даже более низких гармониках $f_{\text{нар}}$ или $f_{\text{внутр}}$.

При значительных дефектах появляются пики непосредственно на самих характерных частотах обката, однако нередки случаи, когда эти пики трудно обнаружить даже для сильно развитых дефектов. Поэтому в любом случае наблюдения за сигналами возбуждения малой амплитуды необходимо вести на высоких частотах. Отметим, что и собственно высоким частотам свойственны относительно малые амплитуды. Реально измеряемые амплитуды дискрет ПК на высоких частотах весьма малы по сравнению с дискретами спектра на низких частотах, например частоте вращения ротора. Если в каком-то случае значения частот от дисбаланса может достигать по виброскорости до 25 мм/с, то в то же время сильно развитый дефект ПК может вызвать амплитуду всего 0,5 – 1 мм/с.

Характерным для внутренних дорожек ПК со значительными дефектами является наличие большого числа гармоник основной информативной частоты, повышенные амплитуды и близость их к $f_{\text{внутр}}$. Присутствуют боковые полосы. Их пики расположены по обе стороны гармоники обычно на одинаковом расстоянии равно частоте вращения вала.

Для наружной дорожки ПК появление таких модуляционных частот нехарактерно прежде всего потому, что у СЭМ внешняя дорожка ПК обычно неподвижна. То же самое справедливо для частоты контактирования шариков с дорожками качения $f_{\text{ш}}$. Если в ПК присутствует дефект шарика, он обычно сопровождается дефектом дорожки, и его часто можно наблюдать в виде боковых полос $f_{\text{нар}}$ или $f_{\text{внутр}}$, отстоящих от них на величину $f_{\text{ш}}$. Редко проявляется собственно составляющая $f_{\text{ш}}$, как правило, проявляется одна сильная гармоника этой частоты, которая указывает на количество шариков со следами повреждения.

Другой вид дефектов, вызывающих характерную вибрацию, связан с сепаратором. Дефекты сепаратора проявляются на частоте вращения сепаратора f_c и сопровождаются, как правило, наличием других повреждений в ПК. Эта составляющая единственная из всех подшипниковых составляющих, которая является субгармоникой. Эту составляющую трудно обнаружить в спектре вибрации, поскольку в тот момент, когда она может возникнуть, у ПК обычно уже имеются серьезные повреждения дорожек качения, а следовательно, весьма

насыщенный спектр вибросигнала. Однако, если проводить тщательный анализ, то можно обнаружить субгармонику и боковые полосы с шагом равным частоте f_c вокруг других характерных частот ПК – $f_{нар}$, $f_{внутр}$ и $f_{ш}$.

Появление в спектре первой гармоники оборотной частоты или боковых модуляционных полос или даже значительного широкополосного шума свидетельствует о существенном изменении геометрии ПК. Когда имеется сильный износ ПК, выражающейся в изменении внутренней геометрии, то можно наблюдать, как в окрестности основных пиков начинают расти боковые полосы. В конечном счете, эти боковые полосы преобразуются в широкополосный шум. Дискретные пики размываются, и спектр теряет свою линейчатую форму. Боковые полосы (суммарные или разностные), как правило, появляются сначала вокруг частоты, связанной с дефектом. Характерным является модуляция колебаний на частоте обката внутренней дорожки качения частотой вращения ротора. Иногда можно увидеть суммарные и разностные частоты вследствие модуляции другой частотой, чем оборотная частота ротора. Например, это может быть частота обката внутренней или наружной дорожки качения, или частота контактирования шариков с дорожками качения, так что дефект наружной дорожки будет проявляться на частоте $f_{нар}$ с боковыми полосами, образованными колебаниями с частотой $f_{ш}$ или f_c , что свидетельствует о наличии множественных дефектов в ПК.

Подчеркнём, что многочисленные гармоники частоты вращения (например от 1 до 8-й) в спектре вибрации говорят о таком дефекте, как ослабление стыков (соединений) в СЭМ. Если в спектре присутствует 3-я гармоника оборотной частоты, или же она заметно выделяется на фоне остальных гармоник, это может свидетельствовать о том, что ПК проворачивается на валу. Если же имеет место неплотная посадка ПК в корпус, в спектре вибрации следует ожидать появления нескольких гармоник частоты вращения вала – обычно доминирующими будут 1 и 4-я гармоники.

Если в ПУ имеет место перекося ПК, его также можно идентифицировать. В этом случае следует обратить внимание на частоту равную частоте вращения вала умноженную на число тел качения в ПК. И если в ПК имеется 8 элементов качения, следует ожидать, что на 8-й гармонике частоты вращения вала будет сильный пик. Кроме того (как и в случаях, связанных с несоосностью), можно ожидать преобладание вибрации в осевом направлении.

Если предполагается, что ПК посажен с перекосям, то для подтверждения этого можно измерить фазовые соотношения вибрации ПК. В случае перекося разность фаз между измерениями, сделанными в противоположных направлениях, будет составлять 180° .

При работе подшипника с явными дефектами во временном вибросигнале появляются характерные гармоники, по которым можно выявить место нахождения дефекта. Численные значения частот этих составляющих зависят от соотношения геометрических размеров подшипника и частоты вращения ротора механизма. Формулы расчета характерных подшипниковых частот являются достаточно простыми, но не всегда удобными для практики. Сложность заключается в том, что они включают в себя угол контакта тел качения с кольцами. Этот параметр не всегда известен точно и в процессе работы подшипника может изменять свое значение. На практике можно использовать более простые формулы, не включающие в себя этот угол, однако результаты будут, естественно, менее точные.

Формула для расчета подшипниковых частот:

– частота перекатывания тел качения по наружному кольцу

$$f_n = n(m/2 - 1,2);$$

– частота перекатывания тел качения по внутренней обойме

$$f_b = n(m/2 + 1,2);$$

– частота сепаратора

$$f_c = (1/2 - 1,2/m);$$

– частота перекатывания тел качения

$$f_{ш} = (m/2 - 1,2/m),$$

где m – число тел качения; n – частота вращения вала.

Формулы для расчета подшипниковых частот полезны, но как уже упоминалось, достоверность диагностики с их использованием может быть не высокой, так как достаточно часто даже при наличии в подшипнике явного дефекта в вибросигнале характерные частоты могут полностью отсутствовать, иметь сдвиг по частоте, или иметь очень малый уровень. Следует ещё раз подчеркнуть:

– все подшипниковые частоты обычно модулируются частотой вращения ротора, что приводит к

возникновению вокруг них характерных боковых гармоник. По мере углубления дефекта число боковых гармоник растет. Дополнительная мощность вибрации от дефекта оказывается сосредоточенной не в основной гармонике дефекта, а вокруг нее, причем в достаточно широком диапазоне частот; – бывает, что реальные частоты характерных гармоник от отдельных элементов подшипника не соответствуют рассчитанным значениям, причем по мере углубления дефектов это отличие растет; – при значительных дефектах на спектре возникают «энергетические горбы» – участки с общим поднятием уровня, имеющие большое количество случайных пиков. Такие «горбы» могут возникнуть как вблизи характерной частоты, так и вблизи собственных частот конструкции или ее отдельных элементов. Часто «энергетический горб» бывает в двух местах спектра – на информативной частоте и на резонансной.

В качестве примера рассмотрим несколько вариантов анализа. На рис. 2 представлен спектр моноблочного центробежного электронасоса с электродвигателем 4ДМШ.

С помощью узкополосного спектрального анализа в спектре идентифицированы дискретные составляющие вибрации электромагнитного и подшипникового происхождения с частотами $f_{об}$ (оборотная), $f_{сет}$ (сети) и $f_{сеп}$ (сепаратора) с их гармониками, субгармониками и комбинационны-

ми частотами. Для диагностики причин повышенных вибраций оказалось необходимо обращать внимание не только на определенные конкретные составляющие в спектре, характеризующие конкретный дефект, но на всю совокупность дискрет, на насыщенность ими спектра, и, особенно, на наличие боковых и комбинационных частот. Например, дискретные составляющие с частотами кратными частоте вращения могут быть вызваны либо износом подшипников и увеличением в них радиального зазора, либо динамическим эксцентриситетом магнитной системы, либо наличием механического касания в уплотнении или других узлах. Однако если бы эти дискретные составляющие вибраций вызваны были бы механическим касанием, то в спектре присутствовали бы только эти составляющие и отсутствовали бы другие составляющие подшипникового и электромагнитного происхождения.

Для машин подвергающихся внешним ударам и вибрациям может оказаться эффективным упрощенный метод вибродиагностики в полосе частот 1000 – 10000 Гц с помощью так называемого пик-фактора. В этих условиях на практике наиболее часто встречаются такие виды дефектов как ослабление посадок (вентиляторов, подшипниковых щитов и т. д.). Эти дефекты характеризуются увеличением пик-фактора. Пик-фактор представляет собой отношение пикового значения вибрации к СКЗ общего

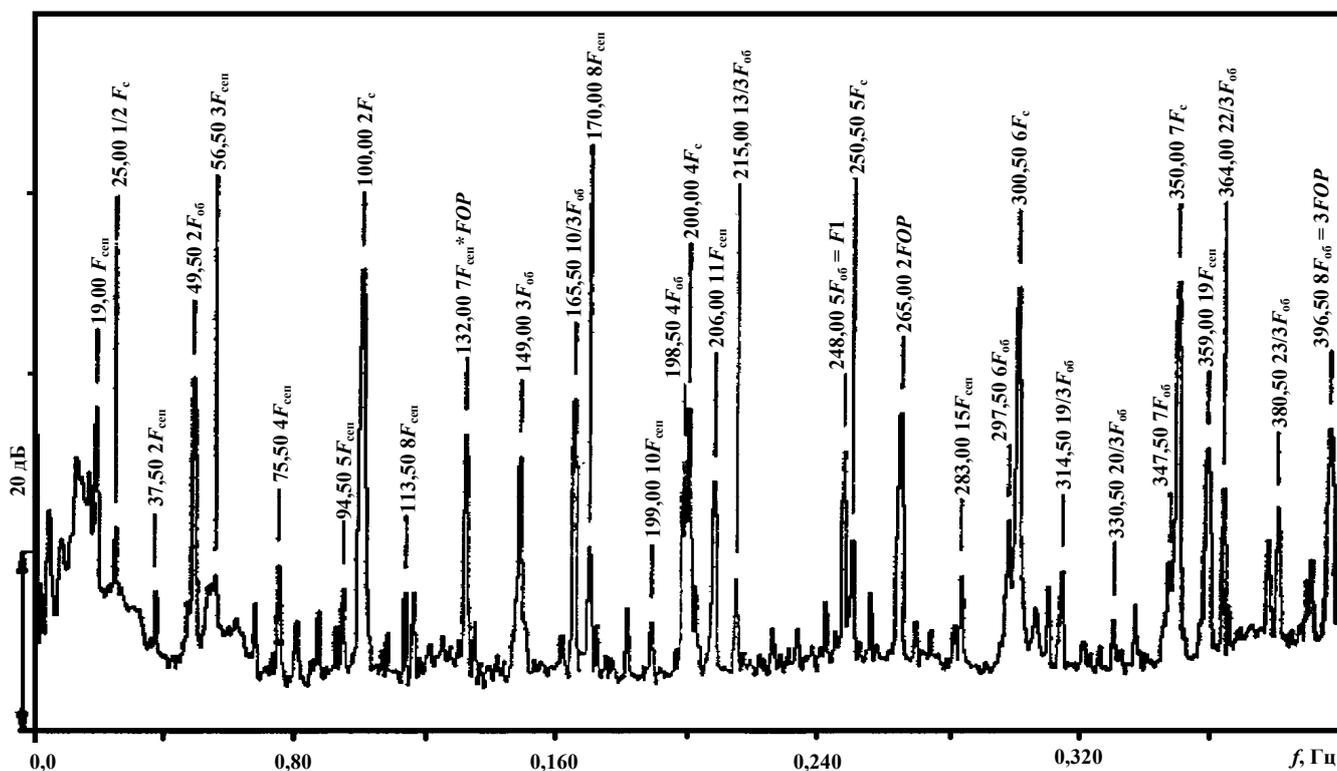


Рис. 2. Спектр моноблочного центробежного электронасоса с электродвигателем 4ДМШ

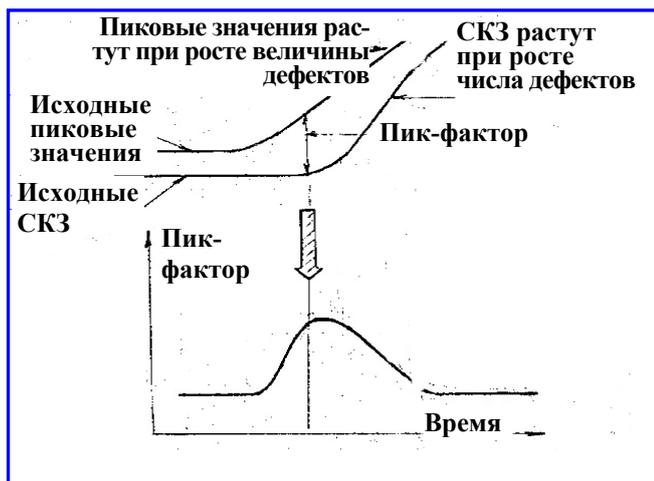


Рис. 3. Пик-фактор

уровня. Показанные на рис. 3 кривые представляют собой общую тенденцию изменения пик-фактора при ухудшении состояния машины.

Ниже приведены экспериментальные величины СКЗ (в числителе) и пиковые значения (в знаменателе) виброускорений для шести ЭД типа ДК-117:

	1	2	3	4	5	6
Виброускорение (g)	0,54/1,7	0,35/1,3	0,48/1,6	0,38/1,6	2,5/24,0	1,8/11,0
Пик-фактор	3,1	3,7	3,3	4,2	9,6	6,1

Первые четыре двигателя, находящиеся в удовлетворительном состоянии, имеют пик-фактор в пределах 3,1 – 4,2. В двигателе 5, у которого имел место значительный износ расточки под подшипниковый щит, пик-фактор равен 9,6. В двигателе 6,

в котором была ослаблена посадка вентилятора, пик-фактор равен 6,1.

Приведенные данные позволяют оценить вероятность возникновения некоторых типовых дефектов ПУ с помощью стандартной виброизмерительной аппаратуры.

Литература

1. Диагностика подшипниковых узлов электрических машин / В.А. Воронкин, А.Л. Цырлин, В.В. Евланов // Машиностроитель. – М., 1993. – № 5. – С. 14 – 17.
2. Диагностика шариковых подшипников с пластичной смазкой по высокочастотному вибрационному сигналу / В.А. Воронкин, К.А. Павлов // Сб. научн. ТР. НПО ВНИПП. – 1987. – № 3. – С. 100 – 109.
3. Оценка технического состояния подшипниковых узлов электрических машин методами высокочастотной диагностики / В.А. Воронкин, В.И. Михайлов, К.А. Павлов // Вибротехника. – 1987. – № 4 (57). – С. 17 – 22.
4. Актуальные вопросы создания подшипников качения с низкими уровнями вибрации для судовых электрических машин / В.А. Воронкин, Е.В. Курасов // Техническая акустика. – СПб., 1999. – Т. 5. – Вып. 1 – 2.
5. Вопросы электромеханики. Методы проектирования малошумных электрических машин. Труды НПП ВНИИЭМ / В.А. Воронкин, В.Я. Геча. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – Т. 103. – 178 с.
6. Эксплуатационные отказы подшипниковых узлов электродвигателей / В.А. Воронкин, В.В. Евланов, А.Г. Горбунов // Станки и инструмент. – М., 1993. – № 5. – С. 13 – 16.
7. Алгоритм анализа вибросигналов, возбуждаемых подшипниками качения электромеханических устройств / В.А. Воронкин, В.Я. Геча // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2005. – Т. 102. – С. 165 – 173.

Поступила в редакцию 23.12.2009

Вячеслав Анатольевич Воронкин, канд. техн. наук, начальник лаборатории, т. 366-33-65.

Константин Александрович Павлов, начальник сектора, т. 366-14-10.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.