

УДК 621.313

ПРИРОДА ВИБРАЦИИ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Губаревич О.В., Козынько А.С.

NATURE OF VIBRATION AND MODERN METHODS OF VIBRO DIAGNOSTICS OF ELECTRIC MACHINES

Gubarevych O.V., Kozynko A.S.

В статье рассмотрена природа возникновения и последствия вибрационного воздействия при работе электрических машин. Приведены современные методы вибродиагностики и диапазон среднеквадратических значений виброскорости для оценки и прогнозирования состояния агрегатов. Приведено описание и характеристики современных приборов для обеспечения постоянного вибромониторинга технического состояния работающего электромеханического оборудования.

Ключевые слова: *вибрация, вибромониторинг, диагностика, среднеквадратичное значение виброскорости, виброанализатор, электромагнитные колебания, механические биения.*

Введение. Одна из распространенных причин повышенной интенсивности отказов электродвигателей — вибрация агрегата, которая влечет за собой отказы подшипников, обмотки, коллектора, а иногда и трещины в чугунной оболочке электродвигателя и в лапах. Появление повышенной вибрации в основном является следствием возникновения различного рода неисправностей электрооборудования. Своевременное обнаружение и диагностика причин возникновения вибрации является современной важной и актуальной задачей.

Целью работы является проведение обзорного анализа вибрационных процессов различной природы, возникающих в электрических машинах, а также ознакомление с современными методами обнаружения неисправностей и оценки технического состояния электрооборудования по вибрационным параметрам.

Изложение основных материалов. Силы, вызывающие вибрацию электрической машины, подразделяются на силы электромагнитного, механического и аэродинамического происхождения.

Природа вибрации электромагнитного происхождения является общей для машин всех типов (среди которых асинхронные электродвигатели

имеют наиболее сложный вид электромагнитного поля). Своеобразие процессов взаимного преобразования электрической и механической энергии, а также индивидуальные конструктивные особенности как типа, так и каждой конкретной машины могут оказывать существенное влияние на характер ее вибрации. Вследствие этого диагностические признаки дефектов цепей в различных типах машин могут существенно различаться.

В электрических машинах присутствуют два основных вида сил создания вибрации электромагнитного происхождения:

-радиальные силы, возникающие при временных и пространственных изменениях магнитного поля в воздушном зазоре между ротором и статором;

-тангенциальные силы, возникающие при взаимодействии магнитного поля с линейной токовой нагрузкой машины.

Характер этих сил определяется изменением МДС обмоток и магнитной проводимостью воздушного зазора машин, т.е. индукцией магнитного поля и линейной токовой нагрузкой в обмотках машины. Источники электромагнитных сил распределены в пространстве и не имеют конкретной точки приложения.

При проектировании электрических машин распределение электрических и магнитных сил и потоков по цепям стремятся создать пространственно симметричным. Их участие в общей вибрации машины в исправном состоянии в большинстве случаев незначительное.

Основное влияние на характер вибрации оказывают уровни технологии изготовления электрической машины, сборки (ремонта) и особенности эксплуатации. Низкое качество первых двух факторов может привести к асимметрии электрических и магнитных цепей, с переходом на нелинейные участки

кривой намагничивания в различных режимах работы машины, а также проявлением нелинейности сопротивления магнитных цепей. Например, отклонения формы статора и ротора, перекосы подшипников (опор) и другие дефекты изготовления и сборки, вызывающие статический и динамический эксцентриситет (т.е. неравномерность воздушного зазора), могут приводить к появлению значительной магнитной асимметрии и изменению характера вибрации. С другой стороны, параметры вибрации машины могут существенно зависеть от условий эксплуатации (например, числа пусков электродвигателя или качества питающей электроэнергии).

Основными источниками вибрации и шума механического происхождения являются: дисбаланс ротора, несоосность и перекося соединений с исполнительным механизмом, остаточная неуравновешенность вращающихся частей электрической машины и т.п. Неуравновешенность ротора образует значительные вибрации и шум, особенно в быстроходных машинах. Это также встречается у машины, некоторое время проработавшей нормально, при смещении обмотки ротора вследствие недостаточной опрессовки, слабого бандажирования (это наблюдается чаще у быстроходных машин), или в случае, не предусмотренного техническими условиями, значительного повышения частоты вращения. Механическая вибрация может быть вызвана и различного рода неисправностями: неправильно центрирован агрегат, состоящий из нескольких машин, неисправная соединительная муфта, неравномерно изношены или поражены коррозией кулачки или звездочки в кулачковых муфтах и т.п. [1, 2].

Среди виброобразующих сил механического происхождения следует отметить вибрацию, обусловленную подшипниками качения. Интенсивность этого источника вибрации и шума зависит от целого ряда факторов, связанных как технологическими допусками и отклонениями при изготовлении подшипникового узла так и с погрешностями изготовления самого подшипника, такими как повышенный зазор между телами качения и кольцами шарикоподшипника, искажением формы посадочных мест под установку подшипника, их несоосностью, овальностью колец сепараторов шарикоподшипников. Основными недостатками подшипников, в машинах с горизонтальным расположением вала, влияющими на уровень вибрации и шума, являются: недостаточная жесткость корпуса подшипника в продольном и поперечном направлениях, совпадение частот собственных колебаний корпуса подшипника с частотой вращения ротора при различных режимах работы электрической машины, эксцентричная нагрузка на корпус подшипника, приводящая к изгибающему моменту в вертикальной плоскости [5].

При трении щеток о коллектор или контактные кольца в электрической машине также создается вибрация и шум, имеющие высокочастотные составляющие. Вибрации и шум, обусловленные кол-

литорно-щеточным узлом, характерны для крупных машин постоянного тока.

Задачу снижения вибрации от остаточной неуравновешенности ротора в настоящее время можно считать практически решенной. Качество современного оборудования для динамической балансировки позволяет выполнить эту задачу с заданной степенью точности, что является условием для получения вибрационных характеристик, удовлетворяющих заданным требованиям.

Все неуравновешенные силы, возникающие в электрических машинах, вызывают изменяющиеся во времени дополнительные нагрузки на подшипники, в результате чего происходит их некоторое виброперемещение. В совокупности с конструктивными недостатками подшипниковых узлов эти силы вызывают дополнительную вибрацию электрической машины в целом.

Силы аэродинамического происхождения вызывают вибрации и шум, уровень которых зависит от правильности выбора количества и формы лопаток, типа вентилятора, его аэродинамических свойств, числа и профиля вентиляционных каналов, правильности расположения вентиляторов относительно деталей и узлов электрической машины. Вибрационные воздействия аэродинамического характера в современных машинах снижены, практически, до технологического допустимого уровня.

При диагностике дефектов, сопровождающихся повышенной вибрацией электрических машин, в первую очередь необходимо установить, является ли ее причина электромагнитного происхождения или механического. Между указанными причинами не всегда можно провести четкую грань: трещина в стержне ротора асинхронного электродвигателя может привести к его местному нагреву и, как следствие, тепловому дисбалансу (в этом случае первопричина — дефект электрического происхождения). В электромеханических системах, особенно при наличии электромагнитных и механических дефектов, одновременное существование и взаимодействие различных вызывающих вибрацию сил может приводить к возникновению сложных сигналов вибрации: электромагнитной модуляции и механических биений.

Процессы электромагнитной модуляции колебаний и механического биения в электрических машинах по форме кривой сигнала вибрации, особенно полигармонической, весьма сложно дифференцировать по природе. Однако, в принципе, это не всегда и требуется: уточнение вида неисправности можно провести с применением спектрального и других видов анализа [6].

Кроме того, вибрация электромагнитного происхождения обладает общим свойством: ее уровень скачкообразно падает при отключении машины от сети в момент начала останова, особенно останова под нагрузкой. Величина скачка вибрации по отношению к ее исходной величине наглядно демонстрирует степень участия механических или элек-

тромагнитных дефектов в общей величине вибрации.

Установлено, что у машин в исправном техническом состоянии, в отличии от имеющих электрические дефекты, изменение величины электрического тока в обмотках при изменении нагрузки в основном не изменяет уровня электромагнитной вибрации.

Вибрационная диагностика электрооборудования является сравнительно молодой отраслью в ряду современных методов неразрушающего контроля. Она включает в себя теорию и способы организации процессов распознавания технических состояний машин и механизмов по исходной информации, содержащейся в виброакустическом сигнале. Вибрационная диагностика основана на измерении и анализе параметров вибрации диагностируемого оборудования и занимает особое место среди прочих видов диагностики.

Вибрационные процессы, возникающие при работе электромеханического оборудования, высокоинформативны и достаточно полно отражают техническое состояние многих узлов и привода в целом, а считывание и обработка вибрационных сигналов позволяет диагностировать и выявлять на ранних стадиях развитие различного рода неисправностей в эксплуатируемом оборудовании.

Самый простой способ вибромониторинга состояния электрической машины - это измерение простейшим контактным виброметром среднеквадратичного значения (СКЗ) вибрации и сравнение его с допустимыми нормами. Нормы вибрации определены рядом стандартов, либо указываются в документации на оборудование и приводятся в основном для виброскорости, поэтому в основном при оценке вибрационного состояния используется термин «СКЗ виброскорости». В стандартах определен метод измерения СКЗ виброскорости в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц и ряд значений виброскоростей, которые изменяются с шагом примерно в 1,6 раза, например: ... 4.5, 7.1, 11.2, ... Для разных по типу и мощности машин задаются свои значения норм из этого ряда.

Таким образом, при оценке вибрации агрегатов с вращающимся ротором, в качестве нормируемых параметров в большинстве случаев устанавливается один из следующих:

- среднеквадратическое значение виброскорости, V_e , мм/с;
- среднеквадратическое значение виброскорости в октавной полосе частот, включающей в себя частоту вращения ротора, V_{e0} , мм/с;
- среднеквадратическое значение виброскорости на элементах крепления агрегата к фундаменту на месте установки, V_{ef} , мм/с;
- пиковое значение (размах) виброперемещения, S_3 , мкм.

В соответствии с одним из существующих международных стандартов оценка интенсивности вибрации при приеме - сдаточных, периодических,

квалификационных, типовых и приемочных испытаниях электрических машин с частотой вращения ротора 3000 об/мин и массой ротора до 2000 кг должна соответствовать величинам, приведенным в таблице 1 [7, 8].

Таблица 1

Значения параметров вибрации

Нормируемые параметры вибрации	Срок эксплуатации не ограничен	Ограниченный срок эксплуатации	Эксплуатация недопустима
КЗ виброскорости V_e , мм/с	до 4,5	4,5 — 7,1	свыше 7,1
СКЗ виброскорости V_{e0} , мм/с	до 3,3	3,3 — 5,2	свыше 5,2
СКЗ виброскорости V_{ef} , мм/с	—	—	свыше 2,0

Другой стандарт на машины электрические вращающиеся с высотой оси вращения свыше 355 мм при приеме-сдаточных, периодических, квалификационных, типовых и приемочных испытаниях регламентирует определять:

- для электрических машин с частотой вращения 600 об/мин и выше среднее квадратическое значение виброскорости опор подшипников,
- для электрических машин с частотой вращения менее 600 об/мин пиковое значение виброперемещения, допустимые значения которых приведены в таблице 2 [8].

Таблица 2

Среднеквадратические значения виброскорости

Частота вращения, об/мин	Среднее квадратическое значение виброскорости V_e , мм/с	
	Способ установки	
	Упругая подвеска	Жесткое закрепление
От 600 до 1800	2,8	2,8
Свыше 1800 до 3600	4,5	2,8
Для осевой составляющей вибрации подшипников, не являющихся упорными	4,5	4,5
Допустимое значение виброскорости сердечника статора	4,5	4,5
	Пиковое значение виброперемещения опор подшипников, мкм	
Менее 600	50	50

Практически в каждой отрасли разработаны и применяются собственные нормативно - методические рекомендации по оценке и прогнозированию состояния агрегатов по вибрационным сигналам.

В настоящее время выпускаются и широко применяются следующие контактные приборы для вибродиагностики и оперативного мониторинга элементов электромеханического оборудования:

Виброметры – измеряют только одно интегральное значение вибрации. Самое распространенное – СКЗ виброскорости, так как существуют стандарты для определения состояния агрегата по значению СКЗ виброскорости;

Виброанализаторы (анализаторы вибрации) – дополнительно измеряют сигналы и спектры вибрации.

По количеству каналов измерения приборы делятся на:

- одноканальный – одновременно измеряет данные только по одному каналу. При этом может одновременно измерять виброускорение, виброскорость и виброперемещение;
- одноканальный с приставкой расширения на несколько каналов – измеряет данные с нескольких датчиков, но частота опроса каналов значительно уменьшается;
- многоканальный с параллельным опросом всех каналов – очень полезный прибор в сложных случаях, так как результат диагностики дефектов намного достовернее.

Таким образом, виброметры используются для оперативной оценки состояния оборудования. Максимальное значение вибрации, при котором состояние агрегата считается аварийным задаётся в паспорте на агрегат. Сравнение текущей вибрации с нормой позволяет наглядно оценить состояние оборудования. Кроме того, значение вибрации, измеренное виброметром можно использовать и для более подробной диагностики дефектов. Например, по СКЗ виброскорости диагностируется центровка и дисбаланс, состояние крепления оборудования к фундаменту, можно также использовать для оперативной балансировки ротора на месте.

Виброанализаторы измеряют сигнал вибрации с вибродатчика и с помощью вычислений преобразовывают полученное измерение в другие виды, например, в спектры. Современные анализаторы очень компактные, они позволяют просматривать данные на месте эксплуатации оборудования и оперативно проводить диагностику дефектов машины. Для более сложных случаев измеренные данные сохраняются в памяти прибора, а затем передаются на компьютер для последующего анализа. Во всех виброанализаторах также есть режим виброметра.

Главным преимуществом такого простого и достаточно информативного метода диагностики дефектов электрооборудования по общему уровню вибрации является то, что для его использования нет необходимости в дополнительном обучении обслуживающего персонала. Кроме того, стоимость технического оборудования, необходимого для данного метода диагностики, минимальная.

Ниже приведены более детальные характеристики некоторых распространенных моделей таких приборов: "Виброметр-К1", "Vibro Vision", "ViAna-1", "ДПК-Вибро" и другие [1].

"ДПК-Вибро" - компактный виброметр, регистратор вибрационных сигналов для оценки техни-

ческого состояния подшипников непосредственно на месте их эксплуатации. Прибор измеряет интегральные параметры вибрации оборудования с помощью встроенного вибросенсора. Такие измерения могут проводиться в размерности виброускорения A (m/c^2), виброскорости V (mm/c) и длины S (mkm), измерения вибрации обычно производятся в стандартном диапазоне частот от 10 до 1000 Гц.

Оценка технического состояния подшипников проводится на основе двух методов:

- расчета и сравнения общего уровня вибрационного сигнала (СКЗ вибросигнала), измеренного на подшипнике, с нормативными значениями;
- анализа параметров ударных импульсов, которые всегда возникают при "обкатывании" разных дефектов на поверхности качения подшипников.

На основании математической обработки ударных импульсов в приборе предлагается оперативный вывод о техническом состоянии рабочих поверхностей контролируемого подшипника.

Для оперативной оценки параметров вибрации используется ViPen - виброметр-ручка, который имеет очень компактный размер и позволяет измерять среднеквадратичное значение СКЗ виброскорости и температуру подшипника. Оценка технического состояния осуществляется на основании трех измеряемых прибором параметров:

- СКЗ виброскорости в диапазоне 10 - 1000 Гц,
- амплитуда виброускорения,
- температура.

Для прогнозирования состояния по вибрации используются нормы на измеряемые параметры, принятые для данного оборудования стандартами предприятия (завода-производителя).

"ViAna-1" (Vibro Analyzer, 1 канал) - одноканальный прибор регистрации и анализа вибрационных сигналов для оперативной диагностики подшипников качения и "безразборной" балансировки роторов и других вращающихся частей различного оборудования. В приборе "ViAna-1" реализован стандартный набор математических функций, которые позволяют проводить различную обработку вибросигналов для оценки состояния подшипников:

- получение классических спектров вибрационных сигналов;
- получение спектров в полосе частот;
- анализ амплитудных и фазовых соотношений между разными гармониками.

Для проведения балансировки роторов и других специализированных работ по виброналадке вращающегося оборудования и механизмов, которые находятся на собственных опорах, прибор позволяет регистрировать вибросигналы с разными параметрами с помощью встроенного и внешнего датчиков. При использовании внешнего датчика вибрации марки "ВК-310А" могут быть зарегистрированы вибрационные сигналы в диапазоне частот от 5 Гц до 5 кГц. Кроме того, в устройстве реализована функция виброметра, которая дает быструю оценку состоянию вращающихся частей оборудования. На

каждую точку измерения получается только одно число СКЗ виброскорости.

Так же существуют бесконтактные методы измерения вибрации, т.е. не связанные с объектом механической связью. Эти методы основаны на зондировании объекта звуковыми, электромагнитными или световыми волнами.

Одна из последних разработок - метод ультразвуковой фазометрии. Суть метода - измерение текущего значения разности фаз опорного сигнала ультразвуковой частоты и сигнала, отраженного от исследуемого объекта. В качестве чувствительных элементов используется пьезоэлектрическая керамика.

Большое распространение также получили оптические методы, основанные на зондировании объекта видимым светом и обладающие высокой разрешающей способностью [6].

Оптические методы бывают 2-х групп.

1) Методы, основанные на регистрации эффекта Доплера.

2) Голографические методы.

К общим недостаткам оптических методов можно отнести следующее: высокие требования к качеству поверхности исследуемого объекта, сложность, габаритность установки, высокую стоимость оборудования и большое энергопотребление.

Выводы. Приведенный в работе анализ использования современных методов вибродиагностики для контроля технического состояния электрооборудования является перспективным диагностическим направлением. Вибромониторинг позволяет устанавливать причины вибрации и при возможности, оперативно устранять их, проверять центровку валов и состояние соединительных муфт, в случае надобности проводить балансировку ротора и других вращающихся частей машин, определять состояние подшипников и дефекты электрооборудования на ранних стадиях их развития, что в конечном итоге позволит свести к минимуму, а возможно и исключить отказы оборудования аварийного характера.

Л и т е р а т у р а

1. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник / О.В. Губаревич. – Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. – 248 с.; табл. 6, іл. 20, бібліогр. 44 найм.
2. Кутін В.М. Діагностика електрообладнання: навчальний посібник /В. М. Кутін, М.О. Ілюхін, М.В. Кутіна. – Вінниця: ВНТУ, 2013. –161 с.
3. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. – М.: Наука, 1984. –129с.
4. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.
5. Гайдамака А.В. Підшипники кочення. Базові знання та напрямки вдосконалення: навч. посіб. / А. В. Гайдамака. – Х.: НТУ «ХП», 2009. – 248с.
6. Руссов В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Руссов. – Пермь, 2012. – 252 с.
7. Васілевський О.М. Нормування показників надійності технічних засобів: навч. посіб. / О. М. Васілевський, В.О. Поджаренко; Вінниц. нац. техн. ун-т. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 129 с.
8. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М.: Машиностроение, 1996. – 276с.

References

1. Gubarevych O.V. Nadijnist' i diagnostyka elektroobladnannja: Pidručnyk / O.V. Gubarevych. – Sjevjerodonec'k: vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2016. – 248s.; tabl. 6, il. 20, bibliogr. 44 najm.
2. Kutin V.M. Diagnostyka elektroobladnannja: navchal'nyj posibnyk /V. M. Kutin, M.O. Ijuhin, M.V. Kutina. – Vinnycja: VNTU, 2013. –161s.
3. Balickij F.Ja., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Homjakov E.I. Vibroakusticheskaja diagnostika zarozhdajushihhsja defektov. – M.: Nauka, 1984. –129s.
4. Chernyj A.P., Rod'kin D.I., Kalinov A.P., Vorobejchik O.S. Monitoring parametrov jelektricheskikh dvigatelej jelektromehanicheskikh sistem: Monografija. – Kremenchug: ChP Shherbatyh A.V., 2008. – 246s.
5. Gajdamaka A.V. Pidshyynyky kochennja. Bazovi znannja ta naprjamky vdoskonalennja: navch. posib. / A. V. Gajdamaka. – H.: NTU «HPI», 2009. – 248s.
6. Russov V. A. Diagnostika defektov vrashhajushhegsja oborudovanija po vibracionnym signalam / V. A. Rusov. – Perm', 2012. – 252s.
7. Vasilevs'kyj O.M. Normuvannja pokaznykiv nadijnosti tehnicnyh zasobiv: navch. posib. / O. M. Vasilevs'kyj, V. O. Podzharenko ; Vinnyc. nac. tehn. un-t. – Vinnycja: VNTU, 2010. – 129 s.
8. Shirman A. R., Solov'ev A. B. Prakticheskaja vibrodiagnostika i monitoring sostojanija mehanicheskogo oborudovanija. – M.: Mashinostroenie, 1996. – 276s.

Губаревич О.В., Козинко О.С. Природа вібрації і сучасні методи вібродіагностики електричних машин

У статті розглянута природа виникнення і наслідку вібраційної дії при роботі електричних машин. Приведені сучасні методи вібродіагностики та діапазон середньоквадратичних значень віброшвидкості для оцінки і прогнозування стану агрегатів. Приведений опис і характеристики сучасних приладів для забезпечення постійного вібромоніторингу технічного стану працюючого електромеханічного устаткування.

Ключові слова: вібрація, вібромоніторинг, діагностика, середньоквадратичне значення віброшвидкості, віброаналізатор, електромагнітні коливання, механічне биття.

Gubarevych O.V., Kozynko A.S. Nature of vibration and modern methods of vibro-diagnostics of electric machines

In this article are considered the nature and consequence of vibration exposure occurrence during work of electric machines. Analyzed the sources of electromagnetic and mechanical vibration's origin and modern methods of contact and non-contact vibro-diagnostics. Given a range of vibro-speed RMS values for an estimation and prognostication

of the state of aggregates on oscillation signals. For a practical application of vibro-diagnostics, description and characteristics of modern devices are provided to maintain permanent vibromonitoring of the technical state of working electromechanics equipment.

Keywords: *vibration, vibro monitoring, diagnostics, vibro speed rms values, vibro analyzer, electromagnetic vibrations, mechanical beatings.*

Губаревич Олег Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля (м. Северодонецьк), plasticcentrum@yandex.ua

Козинко Олександр Сергійович – магістр, гр. ЕСЕ-16дм, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля (м. Северодонецьк), akozyenko1@gmail.com

Рецензент: д.т.н., професор **Соколов В.І.**

Статья подана 27.01.2017