

– в номинальном режиме при изменении коэффициента мощности в диапазоне от 0,4 до 0,88 коэффициент полезного действия устройства нагружения меняется незначительно (92,0–95,8 %).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что энергосберегающее устройство нагружения, построенное на статических преобразователях, имеет достаточно высокие энергетические показатели. Это позволяет считать, что данное устройство может успешно применяться для проведения регламентных испытаний резервных генераторов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Погуляев, М. Н. Энергосберегающее устройство нагружения резервных электрогенераторов / М. Н. Погуляев, А. А. Смахтин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 2017 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2017. – С. 399–401.
2. Погуляев, М. Н. Имитационная модель энергосберегающего устройства нагружения резервных электрогенераторов / М. Н. Погуляев // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель 22–23 ноябр. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» : под. общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 163–164.
3. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

УДК 620.1.08

## **ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ**

**Л. В. Веппер, В. В. Логвин**

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

Внедрение средств технической диагностики позволяет отказаться от обслуживания и ремонта по регламенту и перейти к прогрессивному принципу обслуживания и ремонта по фактическому состоянию, что дает значительный экономический эффект [1].

Спектр и форма сигнала вибрации содержат информацию о характерных дефектах подшипников качения. В этой информации содержатся специфические особенности в зависимости от вида дефекта. Одна из таких характерных особенностей – наличие несинхронных пиков, т. е. пиков, не являющихся кратными гармониками частоты вращения вала электрической машины. Спектр вибрации может содержать как дискретные пики, так и широкополосные частотные области высокого уровня. Во временном сигнале вибрации могут наблюдаться ударные импульсы, обусловленные перекачиванием элементов качения через дефекты дорожек или контактом дорожек с дефектными участками элементов качения.

Важным моментом является то, что колебания, связанные с дефектом подшипника качения, имеют меньшую амплитуду, чем колебания, связанные со многими другими повреждениями, такими, как дисбаланс, несоосность или дефекты зубчатой передачи.

Во временном сигнале вибрации и его спектре присутствуют характерные признаки дефектов подшипников качения, которые сильно зависят от вида дефекта.

Один из таких признаков – 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 узкополосные пики, так и размытые «в виде холмов», в которых сосредоточена вибрационная энергия (рис. 1).

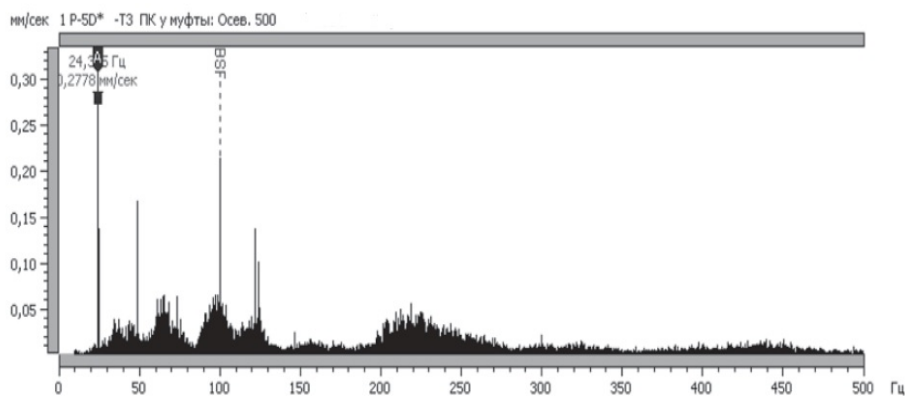


Рис. 1. Выкрашивание тел качения в подшипнике электрического двигателя

Из колебательных сил электромагнитного происхождения в электрических машинах следует выделить:

– магнитные силы, возникающие в результате изменений магнитной энергии в определенном ограниченном пространстве, как правило, в ограниченном по протяженности участке воздушного зазора;

– электродинамические силы, определяемые взаимодействием магнитного поля с электрическим током;

– магнитострикционные силы, вызываемое эффектом магнитострикции, т. е. изменением линейных размеров магнитного материала под действием магнитного поля.

В электрических машинах переменного тока возможно возникновение специфических вибраций двух типов.

Во-первых, это электромагнитные вибрации ферромагнитных сердечников и стальных конструктивных элементов электротехнического оборудования, по которым во время работы оборудования протекает переменный магнитный поток.

Эти вибрации возникают за счет специфического процесса, который в литературе называется магнитострикцией. Этот эффект обусловлен тем, что при перемагничивании ферромагнитных материалов сердечника изменяется внутренняя ориентация элементарных намагниченных частиц, доменов. При каждом перемагничивании сердечника происходит поворот доменов на  $180^\circ$ , что в итоге и приводит к небольшому «линейному расширению» ферромагнитного материала. Поскольку перемагничивание сердечника магнитным потоком осуществляется дважды за один период питающей сети, то и частота вибрации, обусловленная эффектом магнитострикции, равняется удвоенной частоте питающей сети, т. е. 100 Гц. Вне зависимости от оборотной частоты вращения ротора электрической машины частота вибрации сердечника (пакета стали статора) всегда равна 100 Гц.

Во-вторых, вибрации в электрической машине вызываются специфическими электродинамическими силами, которые в литературе принято называть «амперовы-

ми силами», так как их величина определяется по закону Ампера. Самое важное для нас в этом законе заключается в том, что в числителе стоит произведение токов в проводниках, т. е. квадрат тока промышленной частоты. Из тригонометрии следует, что квадрат синусоидального сигнала есть другой гармонический сигнал, но имеющий удвоенную частоту. Таким образом, получаем, что сила электродинамического воздействия между двумя проводниками с синусоидальными токами промышленной частоты имеет удвоенную частоту относительно частоты питающей сети.

Таким образом, вибрации электрической машины, не вызванные механическими проблемами, имеют удвоенную частоту относительно частоты питающей сети, т. е. равную 100 Гц. Это определение относится как к электромагнитным причинам повышенной вибрации, появляющейся в сердечниках электрических машин за счет сил магнитострикции, так и к электродинамическим силам взаимодействия проводников друг с другом, возникающим при протекании токов по обмоткам электрической машины.

#### Литература

1. Баркова, Н. А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования / Н. А. Баркова. – СПб. : Изд. центр СПбМТУ, 2006. – 160 с.

УДК 621.38

### МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ С USB-ИНТЕРФЕЙСОМ

Э. М. Виноградов

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

Интерфейс USB (универсальная последовательная шина) предназначен для подключения различных периферийных устройств к персональному компьютеру. Шина позволяет обеспечить такие основные требования, как высокая скорость передачи, одновременное подключение большого количества устройств, надежная связь, возможность горячего подключения устройств, низкая цена. Шина USB имеет топологию многоярусной звезды, где в центре находится главный компьютер (хост), в средних узлах – хабы, а в конечных точках – индивидуальные устройства. Хост всегда является ведущим на шине и обмен данными осуществляется под его непосредственным управлением.

Передачи по шине (в версии USB 2.0) могут осуществляться в одном из трех режимов: низкая скорость – до 1,5 Мбит/с; полная скорость – до 12 Мбит/с; высокая скорость – до 480 Мбит/с. Для подключения устройств в USB используется 4-жильный кабель: питание  $V_{BUS} = +5$  В; общий GND; сигнальные провода D+ и D-. Устройство, подключенное к USB, может получать от шины ток до 500 мА.

USB поддерживает подключение и отключение устройств в процессе своей работы. Обнаружив вновь подключенное устройство, хост выполняет процесс конфигурирования устройства, чтобы оно стало готовым для работы на шине. При этом устройство передает хосту свои параметры, позволяющие идентифицировать устройство, определить его функции, требования к электропитанию и т. д.

В связи с тем, что в интерфейсе USB реализован сложный протокол обмена информацией, в устройстве сопряжения с интерфейсом необходим микропроцес-