

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Энергетический факультет
Кафедра «Автоматизированный электропривод»
Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**ВЫПУСКНАЯ
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ
РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

Рецензент, нач. группы «Электроприводы»
ОГК, ОАО «ЧМЗ

_____/М.Ф. Фрик /
« ____ » _____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
автоматизированного электропривода,
д.т.н., профессор

_____/ М.А. Григорьев /
« ____ » _____ 2020 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРАЦИИ В НЕИСПРАВНОМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПО ПРОГРАММЕ МАГИСТРАТУРЫ
«ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ»
ЮУрГУ–13.04.02.2020.175 ВКР**

Руководитель, к.т.н., доцент
_____/ А.С. Нестеров /
« ____ » _____ 2020 г.

Автор работы,
магистрант группы П-286
_____/ В.А. Вдовин /
« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер, к.т.н., доцент
_____/ Т.А. Функ /
« ____ » _____ 2020 г.

Челябинск 2020

АННОТАЦИЯ

В.А. Вдовин – Исследование возникновения вибрации в неисправном электроприводе с применением интеллектуальных измерительных устройств. – Челябинск: ЮУрГУ, П-286; 61 с., 30 ил., 4 табл, библи. список – 22 наим.,

Рассмотрены методы измерения вибрации в электроприводе, рассмотрен и обоснован выбор типа акселерометра. Приведены вибрационные характеристики, полученные экспериментальным путем, а также показаны методы определения неисправности электродвигателя.

Задачей проекта является изучение вибрации в асинхронном электродвигателе, методы ее измерения, вибродиагностика. Кроме того, были изучены факторы, влияющие на возникновение вибрации в электродвигателе; области электродвигателя, на которые необходимо крепить измерительное устройство для получения полезного сигнала.

Цель проекта – проектирование устройства, которое снимает вибрационную характеристику двигателя, и передает снятые показатели в математическую модель для расчета ресурса электрической машины.



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА.....	9
2 ИСТОЧНИКИ ВИБРАЦИИ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ.....	11
2.1 Электромагнитные силы как источник колебаний.....	11
2.2 Механические источники вибрации	13
2.3 Звуковые колебания электрической машины	15
2.4 Резонанс двигателя	16
3 МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИБРАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	17
3.1 Вибрация с точки зрения санитарных и технических норм	17
3.2 Методы измерения вибрации.....	18
3.3 Точки измерения вибрации.....	19
4 АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРУЕМОГО УСТРОЙСТВА	21
4.1 Датчики измерения вибрации.....	21
4.2 Пьезоэлектрические акселерометры.....	23
4.3 ИСР-датчик. Подключение и взаимодействие с АЦП.....	24
4.4 Емкостные акселерометры.....	26
5 ОБЗОР МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ВИБРАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ	27
5.1 Порядковый анализ вибрационной характеристики	27
5.2 Вибродиагностика подшипников электрической машины по спектру огибающей вибросигнала.....	28
5.3 Диагностика подшипников по соотношению среднеквадратичного значения и пиков в вибросигнале.....	29
6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ	31
6.1 Снятие вибрационной характеристики с использованием аналогового акселерометра.....	31
6.2 Измерение вибрации цифровым датчиком с обработкой информации на отладочной плате Arduino Nano	35

6.3 Измерение вибрации цифровым акселерометром и передача данных в беспроводной модуль	38
6.4 Измерение вибрации с помощью цифрового акселерометра и отладочной платой STM32F103C8T6	39
7 РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	44
ПРИЛОЖЕНИЕ А	Ошибка! Закладка не определена.
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	Ошибка! Закладка не определена.
ПРИЛОЖЕНИЕ В	Ошибка! Закладка не определена.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день электропривод широко распространен на производственных предприятиях. Это обусловлено простотой его использования и относительно высокими энергетическими показателями. Однако, за год в среднем по всему миру выходит из строя около четверти электроприводов. Такая статистика говорит нам о том, что многие привода либо эксплуатируются неправильным образом, либо работают при перегрузке, либо не обслуживаются электротехническим персоналом. Согласно Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП) потребители должны обеспечить проведение технического обслуживания, планово-предупредительных ремонтов, модернизации и реконструкции оборудования электроустановок [1].

Исследование вибрации позволяет не только предотвратить выход из строя электрической машины, но и дать информацию, необходимую для установления причин появления неисправностей. В настоящее время исследованием вибрации уделяется большое внимание, так как ремонт и замена электропривода на производственном предприятии требует высоких затрат.

Системы вибродиагностики и вибромониторинга применяются для предупреждения поломок оборудования, приводящих к серьезным негативным последствиям. Современные системы вибродиагностики и вибромониторинга постоянно контролируют состояние оборудования. Таким образом, время простоя оборудования сводится к минимуму, благодаря чему повышается производительность и снижаются финансовые потери [2].

С развитием технологий промышленного интернета вещей перед потребителями открываются возможности проводить вибродиагностику удаленно, не требуя при этом визуального осмотра электропривода. Интеллектуальные информационно-измерительные системы позволяют определять вибрационные показатели с высокой точностью, а современные математические аппараты способны просчитать ресурс двигателя на основе информации, поступающей с датчиков, установленных на контролируемом объекте.

Контроль температуры двигателя дает представление о дефектах электропривода, связанных с перегревом обмоток двигателя и его механических узлов, анализ внешнего магнитного поля позволяет получить информацию о дефектах, связанных с электрическими неисправностями. Вибродиагностика электрических машин затрагивает несколько видов дефектов различной физической природы [3].

1 ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА

Исследование возникновения вибрации в неисправном электроприводе с применением интеллектуальных измерительных устройств проводится в рамках проекта «Интеллектуальный электропривод с применением технологий промышленного интернета вещей (IIoT) и дополненной реальности». Исследование посвящено снятию вибрационных показателей электродвигателя и их передача в облачное хранилище для произведения математических вычислений, на основе которых можно судить о текущем ресурсе двигателя и наиболее вероятных неисправностях, связанных в том числе с повышенной вибрацией.

На рисунке 1.1 представлена функциональная схема проекта «Интеллектуальный электропривод с применением технологий промышленного интернета вещей (IIoT) и дополненной реальности».

Интеллектуальное информационно-измерительное устройство или комплекс измерительных устройств установлен на корпусе электрической машины или агрегата, связанного с ней жесткой механической связью. Микроконтроллер или микрокомпьютер, который входит в состав интеллектуального измерительного прибора, обрабатывает полученный сигнал с датчиков. По беспроводной сети производится передача обработанных вибрационных и температурных показателей электропривода в облачный сервис промышленного интернета вещей для расчета ресурса контролируемого двигателя. [4]

Для удаленного контроля и мониторинга состояния электропривода используется приложение на смартфоне или компьютере пользователя. При обнаружении интеллектуальной системой диагностики каких-либо неисправностей пользователь получает уведомление с предупреждением о некорректной работе электрической машины или других контролируемых механизмов, что позволяет заранее предупредить выход электропривода из строя.

На основе вибрационных температурных показателей, установленных на электрической машине, становится возможным предположить о причине

возникшей в двигателе неисправности, что сокращает время ее устранения, снижает трудоемкость отладочного процесса, а также экономит денежные средства предприятия, на котором внедрен интеллектуальный электропривод.

Рисунок 1.1 – Функциональная схема проекта «Интеллектуальный электропривод с применением технологий промышленного интернета вещей (IIoT) и дополненной реальности».

2 ИСТОЧНИКИ ВИБРАЦИИ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ

Вибрация – движение объекта либо группы объектов, вызывающее колебания скалярных величин, которые его характеризуют.

В процессе преобразования энергии в электрической машине возникает ряд явлений, одним из которых является вибрация. Повышенные показатели вибрации могут оказывать неблагоприятные физиологические воздействия на человека, что приводит к нарушению технического процесса, выходу из строя оборудования или опоры, на которой установлено оборудование. Поэтому фактор повышенной вибрации играет важную роль не только в вопросах окружающей среды, но и в вопросах, связанных с охраной труда. По статистике более 70% случаев выхода из строя, а также аварий электрических машин происходит из-за высокой вибрации. [5]

Виброактивность электрической машины определяет ее способность являться источником колебаний. Они могут проявляться в виде вибрации или шума в результате воздействия сил, приводящих к деформации механических узлов электрической машины.

Выделяют следующие составляющие, при одновременном действии которых образуется вибрация электрических машин:

- колебания статора и ротора, вызванные электромагнитными силами в воздушном зазоре – магнитная вибрация;
- колебания деталей и механических узлов, возникающая по причине их деформации, неуравновешенности ротора, а также щеточного контакта – механическая вибрация;

2.1 Электромагнитные силы как источник колебаний

Электромагнитные силы представляются как результат взаимодействия гармоник магнитного поля статора и ротора в воздушном зазоре электрической

машины. Кривая магнитной индукции в воздушном зазоре несинусоидальна, поэтому электромагнитные силы характеризуются вращающимися и пульсирующими волнами. Величина сил зависит от конструктивных и расчетных параметров активного ядра машины, от характеристик статора как колебательной системы, а также от электромагнитных нагрузок. Частота магнитной вибрации в большинстве электрических машин варьируется, в основном, в пределах от 10 до 4000 Гц. Магнитная вибрация вызвана переменными в пространстве и времени электромагнитными силами, которые вызывают переменные упругие деформации и вибрации статора и ротора, воздействуя на их сердечник. [6]

Электромагнитные силы содержат три составляющие: аксиальную, тангенциальную и радиальную. Взаимодействие перечисленных составляющих показано на рисунке 2.1.

Рисунок 2.1 – Составляющие электромагнитной силы

где p_a – аксиальная составляющая;

p_t – тангенциальная;

p_r – радиальная;

D_1 – диаметр воздушного зазора электрической машины.

Под действием переменных аксиальных сил p_a при неплотной прессовке шихтованных сердечников может наблюдаться усиление вибрации.

Тангенциальные силы вызывают колебания зубцов сердечника статора, которые демпфируются проводниками и изоляцией пазов (пульсирующие моменты).

По сравнению с аксиальными и тангенциальными силами радиальные силы вызывают наиболее значительные колебания. Они являются основным источником вибрации.

2.2 Механические источники вибрации

Основными механическими источниками шума и вибрации являются: подшипники, ротор и щеточный аппарат.

Наиболее распространенными механическими причинами возникновения вибрации: неуравновешенность ротора, двойная жесткость ротора и овальность цапф. [7]

Следствием неуравновешенности ротора является несовпадение оси вращения ротора с осью инерции, проходящей через центр тяжести ротора. Существуют частоты, кратные f_0 , при которых проявляется неуравновешенность ротора. Такая вибрация может стать существенным источником шума в быстроходных электрических машинах.

Наряду с несовпадением осей вращения и инерции существует другие причины неуравновешенности ротора:

- неоднородности в литых деталях;
- нарушение concentричности цилиндрических поверхностей после механической обработки;
- деформация вала ротора после напрессовки коллектора или сердечника на вал;
- несимметричная укладка лобовых частей обмотки ротора;
- переменная толщина изоляции по окружности ротора;
- пропитка обмотки ротора неоднородна.

Различают три вида неуравновешенности ротора электрической машины в зависимости от относительного расположения оси инерции и оси вращения:

- статическая;
- моментная;
- динамическая.

Статическая неуравновешенность проявляется в виде центробежной силы при вращении ротора. На рисунке 2.2 показан случай статической

неуравновешенности: ось инерции проходит через центр тяжести, параллельно оси вращения.

Рисунок 2.2 – Статическая неуравновешенность

где 1 – ось вращения;

2 – ось инерции;

3 – центра тяжести.

Моментная неуравновешенность проявляется в виде центробежного момента. Случай моментной неуравновешенности показан на рисунке 2.3: ось инерции пересекает ось вращения и центр тяжести.

Рисунок 2.3 – Моментная неуравновешенность

При динамической неуравновешенности ось инерции пересекает ось вращения не в центре тяжести. Случай динамической неуравновешенности показан на рисунке 2.4.

Рисунок 2.4 – Динамическая неуравновешенность

Центробежная сила и центробежный момент заменяются центробежными силами, которые относят к двум заранее выбранным плоскостям – плоскостям исправления. Плоскости исправления перпендикулярны осям вращения.

Для устранения неуравновешенности существует процедура, названная балансировкой ротора электрической машины. Явление, при котором неуравновешенность остается после балансировки ротора, называется остаточной неуравновешенностью.

В настоящее время эксплуатация большинства электрических машин требует от потребителя оценивать виброактивность электродвигателя, так как на основе энергетических, экономических и массогабаритных показателей не удастся охарактеризовать эксплуатируемый агрегат достаточно точно. Возникает необходимость в контроле вибрационных показателей машин на основе замеров, являющимися исходными данными для ее нормирования [8].

2.3 Звуковые колебания электрической машины

На этапе проектирования электрических машин в том числе производственного назначения уделяется большое внимание вопросам шумовой безопасности. Выделяют три вида происхождения по классификации шума электродвигателей:

- магнитное;
- механическое;
- аэродинамическое.

Механические и электромагнитные вибрации могут привести к возникновению шума электродвигателя, на что обращается внимание в вопросе охраны труда.

Интенсивность звука электрической машины зависит:

- от качества подшипников, т.е. такое изготовление, обеспечивающее минимальные вибрации наружного кольца подшипника при его вращении в специальной испытательной установке вне машины;
- от точности обработки мест под посадку подшипников и замков в щитах для их фиксации относительно корпуса машины, что обеспечит максимальную соосность подшипниковых узлов и отсутствие искажений геометрических форм дорожек качения при посадке подшипников на вал;

- а также от свойств подшипниковых щитов, излучаемых шумов, возбуждаемые подшипником при неудачных конструктивных формах.

2.4 Резонанс двигателя

Детали и механические узлы, а также опора электрической машины могут резонировать с внешними источниками вибрации. Как правило, на производственных предприятиях на этапе проектирования не только самого изделия, включающего в себя электродвигатель, но и производственного помещения, том числе и цеха, вопросу о резонансе рассматриваемой электрической машины уделяется большое внимание.

На фоне корректной работы электрической машины резонанс может свидетельствовать о деформации каких-либо деталей или об изменениях в условиях эксплуатации.

3 МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИБРАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Вибрация с точки зрения санитарных и технических норм

Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.567-96 различают санитарно-гигиеническое нормирование для защиты человека от вибрации и техническое нормирование для защиты электрооборудования от вибрации [9].

Существуют три категории электрических машин в зависимости от требований по вибрации:

- нормальные N;
- с пониженной вибрацией R;
- с особо жесткими требованиями по вибрации S.

Существуют четыре группы электромашин в зависимости от их конструкции, от типа подшипников и конструкции опоры. В зависимости от типа электромашин валы могут располагаться горизонтально, вертикально или под углом, а опоры могут быть различной степени жёсткости.

В зависимости от конструкции электродвигателей, от типа подшипников и конструкции опор подразделяют четыре основных группы. Кроме того, валы электрических машин в зависимости от их типа могут располагаться вертикально, горизонтально и под углом.

Первая группа - электромашины с номинальной мощностью свыше 300 кВт и с высотой вала выше 315 мм. Обычно это – электромашины, оснащенные подшипниками скольжения. Частота вращения вала находится в достаточно широком диапазоне: от 120 до 15000 оборотов в минуту.

Вторая группа – электромашины, номинальная мощность которых находится в пределах от 15 до 300 кВт и с высотой вала от 160 до 315 мм. Обычно это – электромашины, оснащенные подшипниками качения, частота вращения вала превышает 600 оборотов в минуту.

Третья группа – это насосы центробежного типа мощностью свыше 15 кВт с осевыми потоками и с отдельным приводом. Электромашины такого типа оснащаются и подшипниками качения, и подшипниками скольжения.

Четвёртая группа – это насосы центробежного типа мощностью свыше 15 кВт со смешанными или осевыми потоками со встроенным приводом. Электромашины такого типа оснащаются и подшипниками качения, и подшипниками скольжения.

Согласно ГОСТ ИЕС 60034-14-2014 «Машины электрические вращающиеся», которому соответствует допустимая вибрация, производители на этапе изготовления электрической машины балансируют роторы с половиной шпонки [10].

Подразделяется две категории по уровню допустимой вибрации:

- категория А – для стандартных двигателей, без специальных требований к вибрации;
- категория Б – к данной категории предъявляются специальные требования.

3.2 Методы измерения вибрации

Существует два метода измерения показателей вибрации:

- контактный, в котором есть механическая связь вибродатчика с исследуемым объектом;
- бесконтактный, в котором нет механической связи с объектом [8].

Контактный метод представляет собой метод измерения вибрационных показателей пьезоэлектрическими датчиками. Пьезоэлектрические акселерометры позволяют снимать вибрационные характеристики высокой точности на больших при больших амплитудах и низких частотах механических колебаний, но при высоких частотах и малых амплитудах получить точный сигнал не представляется возможным из-за относительно высокой массы датчика: форма сигнала искажается за счет инерции измерительного устройства. Также следует обратить внимание на

массу измеряемого устройства, так как низкая инерционность исследуемого объекта может стать причиной неточности полученных данных.

В некоторых случаях нет возможности связать вибродатчик и электрическую машину. Поэтому на сегодняшний день активно ведутся разработки методов измерения вибрации бесконтактным методом. Отсутствие механической связи электродвигателя с виброметром приводит к повышению точности сигнала, так как виброметр не влияет на массогабаритные показатели измерительной системы. Измерение бесконтактным методом подразумевает зондирование исследуемого агрегата звуковыми и электромагнитными волнами [11].

3.3 Точки измерения вибрации

Измерения производятся на доступных частях электрических машин, как правило, на краях корпуса. Важно обратить внимание на отсутствие внешних источников вибрации, особенно на отсутствие резонанса механических узлов электромашины, иначе показатели вибрации на выходе датчика окажутся неточными. Обработать такой сигнал – очень трудоемкий процесс. Точки измерений, а также их направления, необходимо выбирать так, чтобы показания виброметров были достаточно информативными в отношении динамических сил, возникающих в электромашине [12].

Измерения следует проводить в двух перпендикулярных радиальных направлениях на верхней панели или подшипниковых опорах как показано на рисунке 3.1, рисунке 3.2 и рисунке 3.3.

Рисунок 3.1 – Точки измерения вибрации для горизонтально установленной машины

Рисунок 3.2 – Точки измерения вибрации

Рисунок 3.3 – Точки измерений для вертикально установленной машины

В случаях, когда электрическая машина установлена вертикально или под углом, необходимо выбрать такое направление измерений, при котором сигнал акселерометра становится максимальным. При обработке сигнала важно понимать, в каком положении находилось измерительное устройство относительно электродвигателя и в каком положении находился двигатель относительно вектора силы тяжести. Если измерения производятся одним датчиком, то необходимо обладать полной информацией о вибрации подшипникового узла – в этом случае измерения одним виброметром допускаются. В основном, при измерениях используют два и более датчиков, так как невозможно точно измерить вибрацию подшипника одним датчиком [13]. При исследовании вибрации электропривода необходимо обращать внимание на другие агрегаты измеряемой системы: двигатель жестко связан с рабочим органом, тормозом (в том числе электромагнитным). Поэтому возникает необходимость в измерении вибрации не только исследуемого двигателя, но и остальных агрегатах, связанных с ним.

4 АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРУЕМОГО УСТРОЙСТВА

4.1 Датчики измерения вибрации

Исследованию колебательных процессов уделяется большое внимание при разработке, испытании и эксплуатации разнообразных технических и технологических устройств, в том числе в электроприводе и машиностроении.

Применение акселерометров играет важную роль в вопросах, связанных не только с общим развитием техники, но и повышением надежности и безопасности ее работы. На сегодняшний день измерительно-информационные системы виброконтроля, мониторинга, диагностики и автоматического управления сложными техническими системами и технологическими процессами, дающими не только большой технико-экономический эффект, но и способствующие предотвращению аварий, получают широкое распространение.

Датчики регистрации вибрационных и ударных колебаний являются начальным звеном таких систем и располагаются непосредственно на контролируемом объекте, осуществляя преобразование измеряемой механической величины в электрический сигнал, поступающий на регистрирующее устройство. Зачастую к датчикам предъявляются особые требования, прежде всего, к их надежности и стабильности метрологических характеристик, так как условия эксплуатации акселерометров часто являются сложными и неблагоприятными: при высоких температурах, сильных переменных магнитных полях, интенсивных вибрационных и ударных перегрузках, высоких давлениях и проникающих излучениях [14].

Акселерометры различают по чувствительным элементам и принципу действия. Прежде чем осуществить выбор оборудования необходимо определить тип предполагаемых измерений. Для электропривода характерна высокочастотная вибрация, как правило, с низкой амплитудой. Необходимо выбрать такой тип

акселерометров, которые имеют высокую чувствительность и помехоустойчивость.

Емкостные акселерометры высокой чувствительности и узкой полосой пропускания. Амплитудно-частотная характеристика начинается от 0 Гц. Погрешность чувствительности в диапазоне рабочих температур до 180 град. по Цельсию не превышает 1,5%. В основном, такие акселерометры используются для измерений низкочастотных вибраций, движения и установившегося ускорения.

Пьезорезистивные акселерометры имеют очень низкую чувствительность, поэтому используются для измерения ударного ускорения. Пуско-регулирующие аппараты работают в полосе частот от 500 Гц до 130 кГц, при этом их амплитудно-частотная характеристика может начинаться от 0 Гц или оставаться неизменной. Благодаря этому явлению становится возможным измерение вибрационных характеристик за большой промежуток времени.

Пьезоэлектрические акселерометры широко применяются в тестировании оборудования и измерении вибрации. Эти устройства работают в диапазоне частот от 10 Гц до 30 кГц и, как правило, имеют высокую чувствительность.

Наиболее распространенными являются пьезоэлектрические акселерометры, которые преобразуют ударное или вибрационное ускорение в пропорциональный электрический сигнал.

Выходной сигнал акселерометра может быть аналоговым или цифровым. Аналоговые акселерометры существенно дешевле, однако к ним, как правило, приходится подключать внешние фильтры и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Фиксированный сигнал преобразуется в дискретный код, который поддается обработке [15].

Виды аналоговых выходов:

- Дифференциальные двухфазные;
- ICP-выходы;
- Токовые выходы.

Конструкция предполагает использование двух выходов: прямого и инверсного. Значение сигнала определяется напряжением между этими выходами.

Датчик с ICP-выходом – это устройство с пьезоэлементом и предусилителем. В соответствии с технологией, датчик должен быть подключен по двухпроводной схеме. При этом устройству требуется питание от внешнего источника тока. Чтобы измерения были максимально точными, такой акселерометр часто используют вместе с модулем АЦП, но не простым, а оснащённым специальными разъёмами под ICP-датчик.

Акселерометр с токовым выходом имеет довольно низкое энергопотребление и высокую стабильность показаний. Такие акселерометры оснащаются кремниевыми монокристаллами, которые выполняют функции чувствительного ёмкостного элемента [16].

4.2 Пьезоэлектрические акселерометры

Пьезоэлектрические акселерометры обладают следующими преимуществами:

- высокой стойкостью к внешним воздействиям;
- отсутствием движущихся частей, гарантирующим высокую надёжность и долговечность; – возможностью реализации малогабаритного исполнения;
- широким рабочим диапазоном частот;
- линейностью амплитудной характеристики (АХ) в широком динамическом диапазоне;
- технологичностью в производстве.
- активным характером преобразования, не требующим применения источника питания;

Сигнал на выходе пьезоэлектрического акселерометра пропорционален измеряемому ускорению механических колебаний. Он преобразуется в сигнал, пропорциональный виброперемещению или виброскорости [17].

Электромеханический преобразователь и пьезоматериал, который используется в изготовлении, определяют точность показаний датчика и его эксплуатационные характеристики. Пьезоэлектрические акселерометры, кроме электромеханического преобразователя, могут содержать встроенные электронные устройства, например, согласующий усилитель (СУ), схему первичной обработки сигнала и др.

Пьезоэлектрические датчики с выходным сигналом по напряжению широко распространены в настоящее время, так как они наиболее удобны в бытовом и промышленном применении. Практически все производители пьезоэлектрических датчиков придерживаются единой технологии изготовления, поэтому взаимозаменяемы между собой. Дополнительных внешних компонентов к акселерометру не требуется, так как в их структуре присутствует усилитель заряда. Для питания пьезоэлектрических датчиков требуются стандартные коаксиальные кабели.

Пьезоэлектрические акселерометры промышленного исполнения отличаются более благоприятными техническими характеристиками такими как: пониженные собственные шумы, более широким температурным диапазоном, повышенной степенью защиты и т.д. Единственным недостатком промышленных пьезоэлектрических датчиков является относительно высокая цена (от 15 т. р.). В состав многих промышленных датчиков входит сторонняя электроника, что объясняет их высокую стоимость.

4.3 ICP-датчик. Подключение и взаимодействие с АЦП

ICP датчик – это пьезоэлектрический датчик с внутренним предусилителем заряда, подключающийся по двухпроводной схеме. Питание датчика должно происходить от внешнего источника постоянного тока (до 20 мА), а выходной сигнал датчика – это переменная составляющая напряжения на выходе датчика с максимальным амплитудным значением порядка 8 В. Важно то, что благодаря электронике датчика всегда поддерживается уровень постоянной

составляющей напряжения сигнала на выходе (напряжение смещения) порядка 10 В (например, в случае амплитуды переменной составляющей 8 В мгновенное напряжение может меняться в границах (10 ± 8) В). Двухпроводная схема ИСР-датчика показана на рисунке 4.1.

Рисунок 4.1 – Двухпроводная схема

Правильность подключения ИСР датчика можно проконтролировать, например, непосредственным измерением напряжения смещения вольтметром постоянного тока. Типичный паспортный диапазон значений напряжения смещения составляет от 8 до 12 В (но рекомендуется сверить измеренное значение с паспортными данными на конкретный датчик). У классического ИСР-датчика напряжение смещения, определяющее «рабочую точку» ИСР-датчика, не несёт информацию об измеряемом сигнале, а несёт информацию об исправности датчика и исправности линий, которыми он подключен.

ИСР-датчик является относительно низкоомным источником переменного напряжения сигнала, его выходное сопротивление типично составляет около 100 Ом. Со стороны приёмника сигнала ИСР-датчик запитывается от высокоомного источника постоянного тока. Отсутствие низкоомной нагрузки со стороны приёмника обеспечивает независимость от сопротивления проводов результата измерений переменной (информационной) составляющей сигнала. Постоянное напряжение смещения, вызванное протеканием постоянного тока питания через сопротивление проводов, не влияет на переменную составляющую измеряемого напряжения сигнала.

Особая экономическая выгода и простота использования ИСР-датчика при построении измерительного тракта достигается при совместном использовании с модулем АЦП со специализированными под ИСР-датчик входами, например, совместно с LTR24-2, LTR25, поскольку не требуется каких-либо дополнительных устройств: эти специализированные АЦП полностью обеспечивают все необходимые электрические условия работы ИСР-датчика.

Но ИСР-датчики можно подключить и к АЦП общего применения с высокоомным входом (например, LTR22, LTR24-1) с применением специального устройства согласования (стабилизатор тока и RC-цепь в экранированной конструкции) с внешним источником питания. Однако, подобное устройство согласования не обеспечивает совместимость с АЦП с входным коммутатором каналов в многоканальном режиме [18].

По своей конструкции ИСР-датчик может быть изолированным или неизолированным. Изолированный ИСР-датчик, как правило, имеет два изолированных от корпуса выхода А (+) и В (-), и корпус датчика непосредственно привинчивается к объекту измерения. Неизолированный ИСР-датчик, как правило, имеет коаксиальный выход, экран которого связан с корпусом датчика.

При выборе ИСР-датчика основными характеристиками являются:

- Диапазон измерения физической величины (размерность: для датчика ускорения [м/с²], для силы [Н], и т.д.);
- Чувствительность датчика – величина, обратная коэффициенту передачи;
- Полоса частот пропускания [Гц...Гц];
- Коэффициент передачи (с размерностью, например, для датчика ускорения [В/(м/с²)], для датчика силы [В/Н], и т.д.).

4.4 Емкостные акселерометры

Что касается емкостных акселерометров, то при работе с ними необходимо наличие специальных малошумящих кабелей, которые значительно дороже стандартных коаксиальных кабелей. Более того, необходимо наличие линейных усилителей заряда и линейных конверторов для подключения датчиков. Таким образом, справедливо следующее утверждение: емкостные акселерометры предпочтительны для высокотемпературных измерений неизвестных заранее ускорений.

5 ОБЗОР МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ВИБРАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Вибродиагностика – одна из важнейших практических функций службы диагностики. Поэтому эффективность и полезность измерений определяется правильным выбором оборудования и техническими средствами обработки вибрационных показателей. В настоящей главе рассматриваются достоинства и недостатки различных методов обработки сигнала акселерометра, а также технические средства, реализующие эти методы диагностики.

5.1 Порядковый анализ вибрационной характеристики

В условиях промышленной эксплуатации акселерометра измерение вибрации конкретного электродвигателя является непростой задачей, так как электропривод вибрирует не только от собственной работы, но и от сторонних источников вибрации. Существует решение этой проблемы – метод синхронного накопления или порядковый анализ.

Одним из удобных и эффективных способов диагностики и балансировки вращающихся механизмов, зубчатых передач является применение порядкового анализа. При наличии датчика оборотов и вибродатчиков можно исследовать временные характеристики сигналов вибрации механических объектов. Практика показывает, что сигнал вибродатчика зашумлен сигналами от других источников. Для того чтобы отстроиться от мешающих сигналов реализуется метод синхронного накопления сигналов. На каждом обороте вала датчик оборотов дает метку оборота. Этот сигнал является запускающим стробом для развертки сигнала вибродатчика. Получаемые развертки сигналов суммируются. При этом все источники сигналов связанных с частотой оборотов накапливаются и увеличиваются в сумматоре линейно пропорционально количеству оборотов N . Все остальные сигналы, некоррелированные с вальной частотой, накапливаются

пропорционально $N^{1/2}$, и при большом количестве усреднений полезный сигнал превышает уровень помехи [19].

Такой алгоритм реализует программа ZetLab Vibro. Скриншот представлен на рисунке 5.1.

Рисунок 5.1 – Анализ сигнала методом синхронного накопления

5.2 Вибродиагностика подшипников электрической машины по спектру огибающей вибросигнала

Данный метод объясняется следующим образом: во-первых, в зависимости от того, у какого элемента механической системы обнаружен дефект, частота следования ударов в сигнале будет изменяться. Частота ударов обусловлена геометрическими размерами электрической машины и частотой вращения вала. Во-вторых, после каждого удара в подшипнике будут возникать свободные затухающие колебания, длящиеся достаточно длительное время. Требуется, чтобы колебания занимали широкий диапазон частот для настройки измерительной системы регулированием параметров полосовых фильтров.

При помощи полосового фильтра (аналогового или цифрового) из всего сигнала выделяется узкий диапазон частот. Полученный сигнал регистрируется цифровым детектором (строится огибающая сигнала), а от нее берется обычный спектр.

Проанализировав соотношения амплитуд гармоник полученного сигнала в спектре огибающей, можно судить о состоянии подшипникового узла. Необходимо помнить о том, что полученный спектр строится только по его узкополосной выборке. Поэтому амплитуды гармоник приводятся не в "точных" значения виброускорения, а в единицах относительной модуляции сигнала. Это также существенно усложняет интерпретацию результатов и итоговую диагностику [20].

У описываемого метода обработки вибрационной характеристики существует огромный недостаток: неисправность, которая возникает на обойме подшипника ведет к пропорциональному росту вибрационных показателей. Это затрудняет расчет остаточного ресурса подшипника. В процессе развития неисправности возникает явление, при котором по спектру огибающей сигнала признаки развития дефекта начинают снижаться. Система диагностики сигнализирует об улучшении состояния подшипникового узла. Спустя некоторое время в спектре огибающей восстанавливается пропорциональность между степенью развития дефекта и его признаками. «Улучшение» может наблюдаться до половины общего времени диагностики электрической машины от момента возникновения неисправности до выхода подшипника из строя. Такое явление объясняется следующим образом: на первом этапе развития дефекта обоймы вся энергия удара возникает в зоне контакта одного тела качения с зоной дефекта. По мере разрастания зоны возникает такая ситуация, что тело качения проходит зону дефекта, но сила удара уменьшается за счет того, что в это время ротор опирается на два других тела качения, расположенные с двух сторон зоны дефекта. Сила удара уменьшается в 2-3 раза, поскольку они обкатывают обойму вне зоны дефекта. В результате, система диагностики дает пропорциональное улучшение состояния подшипника качения.

5.3 Диагностика подшипников по соотношению среднеквадратичного значения и пиков в вибросигнале

Принцип этого метода диагностики достаточно прост – производится сравнение значений амплитуд пиков с среднеквадратичным значением (далее – СКЗ) вибросигнала. На сколько относительная амплитуда пиков вибрации превышает величину СКЗ ударных вибраций, тем выше степень неисправности подшипникового узла, соответственно, тем ниже остаточный ресурс бесперебойной работы электрической машины. При правильной реализации описанного метода техническими средствами он является очень чувствительным, превышающим по

своим параметрам все выше описанные методы. Как правило, такой метод диагностики реализуется в виброметрах – наиболее бюджетных средствах виброконтроля [21].

6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ

6.1 Снятие вибрационной характеристики с использованием аналогового акселерометра

Для проведения эксперимента по измерению вибрации электрической машины был определен перечень необходимого оборудования:

- два асинхронных электродвигателя одинаковой модели: в рабочем состоянии и с дефектом вала.
- аналоговый датчик вибрации(акселерометр).
- цифровой осциллограф с поддержкой USB-интерфейсу.
- провода для электрических соединений.

Для исследования вибрации был подобран асинхронный электродвигатель с фазным ротором, работа которого сопровождается биением вала. Был подобран аналоговый акселерометр ADXL335 (рисунок 6.2), характеристики которого представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Технические характеристики ADXL335

План проведения эксперимента:

- установка акселерометра на асинхронный электродвигатель без дефекта вала;
- подключение датчика к элементу питания;
- подключение осциллографа к датчику вибраций;
- снятие осциллограммы с датчика вибраций;
- получение данных с осциллографа через USB-накопитель;

- установка акселерометра на асинхронный электродвигатель с дефектом вала;
- подключение датчика к элементу питания;
- подключение осциллографа к датчику вибраций;
- снятие осциллограммы с акселерометра;
- получение данных с осциллографа через USB-накопитель;
- обработка полученных осциллограмм;
- сравнение осциллограмм;
- выделение первой гармоники сигнала.

Датчик установлен на край крышки электродвигателя – контактный способ измерения вибрации (рисунок 6.1). К выводам акселерометра был подключен 4-х канальный осциллограф (рисунок 6.3), благодаря чему были получены значения вибрации в трех проекциях. Подключения производились согласно схеме, представленной на рисунке 6.8.

Рисунок 6.1 – Расположение осей измерения относительно исследуемого двигателя

Обработанные экспериментальные данные показаны в приложении А, построенные вибрационные характеристики в трех координатах (последовательно x , y , z). Измерения вибрации электродвигателя были произведены на разных скоростях:

- $n_0 = 1500$ об/мин (рисунок 6.4);
- $n_1 = 1000$ об/мин (рисунок 6.5);
- $n_2 = 750$ об/мин (рисунок 6.6);
- $n_3 = 500$ об/мин (рисунок 6.7).

Рисунок 6.2 – Аналоговый акселерометр ADXL335

Рисунок 6.3 – Осциллограф Fluke 192C

Рисунок 6.4 – Сигнал акселерометра на скорости $n_0 = 1500$ об/мин;

Рисунок 6.5 – Сигнал акселерометра на скорости $n_0 = 1000$ об/мин;

Рисунок 6.6 – Сигнал акселерометра на скорости $n_0 = 750$ об/мин;

Рисунок 6.7 – Сигнал акселерометра на скорости $n_0 = 500$ об/мин;

Рисунок 6.8 – Принципиальная схема измерительной системы ADXL-335-Fluke-192C

Первый из трех графиков характеризует сигнал датчика по оси абсцисс, второй по оси ординат, третий по оси аппликат. Удалось обработать лишь один из 12 сигналов (см. рисунок 6.4).

Отсутствие полезного сигнала можно объяснить по нескольким причинам:

- ADXL335 – бюджетный аналоговый датчик, обладающий низкой помехоустойчивостью;
- наводки от различных устройств, в том числе осциллографа, которые находились в лаборатории при проведении эксперимента.

На осциллограмме координаты акселерометра x (далее – вибрационная характеристика), полученной при скорости двигателя $n_0 = 1500$ об/мин, зарегистрированы колебания.

Высчитаем частоту колебаний по формуле (1):

$$f = \frac{N}{t}, \quad (1)$$

где f – частота колебаний, Гц;

N – количество колебаний;

t – время измерения, с.

$$f = \frac{10}{5 \times 10^{-3}} = 2000 \text{ Гц}.$$

Обращаем внимание, что частота колебаний выше числа оборотов двигателя, значит угол вала между колебаниями меньше 360° . это указывает, на механическую неисправность, связанную, прежде всего, с нарушением работы подшипникового узла.

Характер биений исследуемой электрической машины напоминает следствие неуравновешенности ротора, но тогда частота биений была бы равна или кратна частоте вращения вала.

Что касается виброускорения электрической машины, то стоит отметить, что по умолчанию разрешение акселерометра ADXL335 – 300 мВ/g, где g – ускорение свободного падения. Согласно вибрационной характеристике, средняя амплитуда колебаний напряжения на выходе акселерометра равна $U_{cp} = 80$ мВ. Таким образом, среднее виброускорения электрического двигателя по оси акселерометра x составляет 0,27g.

Для исследования вибрации электродвигателя при неисправностях в его электрических цепях, следует воспользоваться цифровым акселерометром, так как он обладает более высокой помехоустойчивостью по сравнению с аналоговым.

6.2 Измерение вибрации цифровым датчиком с обработкой информации на отладочной плате Arduino Nano

Состав измерительной системы изменился следующим образом:

- асинхронный двигатель, вибрация которого соответствует норме;
- цифровой акселерометр;
- отладочная плата для обработки сигнала акселерометра;
- макетная плата и провода для электрических соединений;
- ноутбук для снятия характеристик.

Для следующего эксперимента был выбран цифровой акселерометр ADXL345. Характеристики датчика представлены в таблице 6.2

Таблица 6.2 – Технические характеристики ADXL345

Для снятия вибрационной характеристики двигателя цифровым датчиком необходимо выбрать микроконтроллер для передачи и записи измерений. Для лабораторных условий был выбран микроконтроллер Arduino Nano (рисунок 6.9), технические характеристики которого представлены в таблице 6.3. Распиновка отладочной платы представлена на рисунке 6.10.

Рисунок 6.9 – Микроконтроллер Arduino Nano

Таблица 6.3 – Технические характеристики Arduino Nano

Рисунок 6.10 – Распиновка микроконтроллера Arduino Nano

Акселерометр подключается к микроконтроллеру по интерфейсу I2C согласно схеме, показанной на рисунке 6.11. Мониторинг и запись сигнала производится через USB кабель, подключенный к микроконтроллеру. Этот же кабель подводит питание к измерительной системе.

Датчик располагается на двигателе таким же образом, как и в предыдущем эксперименте. Вибрационные характеристики показаны на рисунках 6.12-6.15. Самая верхняя характеристика описывает координату x акселерометра, средняя – y , а самая нижняя – z .

План проведения эксперимента:

- разработка программного обеспечения для обработки сигнала;
- установка акселерометра на исследуемый двигатель;
- подключение датчика к микроконтроллеру;
- подключение измерительной системы к ноутбуку для мониторинга и записи сигнала;
- снятие вибрационной характеристики при нормальной работе двигателя на холостом ходу;
- получение данных с осциллографа через USB-накопитель;
- имитация сбоя питания электродвигателя (обрыв фазы)
- обработка и анализ полученных характеристик;
- сравнение результатов текущего эксперимента с предыдущим.

Рисунок 6.11 – Принципиальная схема измерительной системы

Рисунок 6.12 – Сигнал акселерометра при скорости вращения вала $n = 0$ об/мин

Рисунок 6.13 – Сигнал акселерометра при скорости вращения вала $n = 750$ об/мин

Рисунок 6.14 – Сигнал акселерометра при скорости вращения вала $n = 1500$ об/мин

Рисунок 6.15 – Сигнал акселерометра при скорости вращения вала $n = 1500$ об/мин при обрыве фазы, приложение момента к валу двигателя

На первых трех характеристиках амплитуда и частота вибрации двигателя лежит в пределах нормы. Четвертая характеристика была снята при обрыве фазы, затем при приложении нагрузки к валу двигателя.

По вибрационной характеристике на рисунке 6.15 видно, что обрыв фазы приводит к вибрациям по осям x и y при относительно неподвижной оси z . Колебания такого характера могут быть распознаны интеллектуальной системой, благодаря чему пользователь получает информацию, в которой содержится не только предупреждение о некорректной работе привода, но и о возможной причине неисправности. Для передачи данных с микроконтроллера потребуется устройство беспроводной связи.

6.3 Измерение вибрации цифровым акселерометром и передача данных в беспроводной модуль

Для реализации данного эксперимента необходимо наличие следующих компонентов:

- цифровой акселерометр (ADXL345);
- микроконтроллер для обработки сигнала (Arduino Nano);
- модуль беспроводной передачи данных.

В качестве беспроводного модуля была подобрана плата Wi-Fi ESP8266 (ESP-01), показанная на рисунке 6.16. Технические характеристики платы показаны на рисунке 6.4.

Таблица 6.4 – Технические характеристики платы Wi-Fi ESP8266 (ESP-01)

Рисунок 6.16 – Модуль Wi-Fi ESP8266 (ESP-01)

6.4 Измерение вибрации с помощью цифрового акселерометра и отладочной платой STM32F103C8T6

Для повышения точности измерений вибрационной характеристики исследуемого двигателя в качестве альтернативного варианта отладочной платы был подобран микроконтроллер с более высокой производительностью STM32F103C8T6 (рисунок 6.17), характеристики которого представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Технические характеристики STM32F103C8T6

Рисунок 6.17 – Отладочная плата на базе микроконтроллера STM32F103C8T6

Акселерометр подключается к микроконтроллеру по интерфейсу I2C согласно схеме, показанной на рисунке 6.18. Мониторинг и запись сигнала производится

через USB кабель, подключенный к микроконтроллеру. Этот же кабель подводит питание к измерительной системе.

Рисунок 6.18 – Схема эксперимента

7 РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ

Вибродиагностика в промышленных условиях предъявляет к измерительным устройствам более высокие требования, так как на производственных предприятиях становится сложнее получить наиболее достоверный сигнал по причине наличия множества сторонних источников вибрации. Кроме того, ухудшаются условия эксплуатации системы интеллектуального электропривода, поэтому вопросу о повышении надежности измерительного устройства уделяется большое внимание. Для разработки интеллектуального устройства измерения вибрации был выбран Датчик вибрации VBT-1, показанный на рисунке 7.1. Технические характеристики датчика показаны в таблице 7.1.

Рисунок 7.1 – ДАТЧИК ВИБРАЦИИ VBT-1

Таблица 7.1 – Технические характеристики датчик вибрации VBT-1

Данные с датчика необходимо передавать по беспроводной сети. Для реализации этого процесса было подобрано устройство сбора и передачи данных VM8034, который показан на рисунке 7.2, технические характеристики устройства приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Технические характеристики устройства сбора и передачи данных VM8034

Рисунок 7.2 – Устройство сбора и передачи данных VM8034

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования возникновения вибрации в неисправном электроприводе были рассмотрены источники вибрации электродвигателя, их причины и следствия. Были изложены методы измерения вибрации.

Для выяснения причин неисправности был проведен анализ измерительного оборудования, были подразделены датчики измерения вибрации, а также было проведено их сравнение.

Сделан обзор методов обработки вибрационной характеристики двигателя, проведено их сравнение и анализ

В ходе исследования вибрации в неисправном электроприводе были проведены эксперименты с разными акселерометрами для сравнения показателей виброускорения измеряемого электрического двигателя.

Рассмотрены возможные виды неисправностей электродвигателя, предложены методы их определения на основании вибрационных характеристик, полученных с измерительных устройств, установленных на контролируемом агрегате. Установлена связь вибрационных характеристик и возможных причинах неисправностей исследуемого электрического двигателя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 304 с.

2 Стандарт предприятия: курсовые и дипломные проекты. Общие требования к содержанию и оформлению. СТО ЮУрГУ 04 – 2008. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

3 Тэттэр, В. Ю. Разработка технологий и оборудования для вибродиагностики колесно-моторных блоков локомотивов : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / В. Ю. Тэттэр. — Омск, 2005. - 193 с.

4 ГОСТ ИСО 5347-0-95. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара, 1995. – 5 с.

5 Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб.пособие / А.В.Барков, Н.А. Баркова. - СПб.: СПбГМТУ, 2003. - 156 с.

6 Вибрация в технике: справочник. – Т. 6. Защита от вибрации / под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.

7 Русов В. А. Обзор вибрационных методов и технических средств, предназначенных для диагностики подшипников качения // Главный механик. - 2009. — № 3. — с.15-18.

8 СанПиН 2.2.1/2.1.1.567-96. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. Изд-во стандартов, 1996. – 10 с.

9 Баркова Н.А., Дорошев Ю.С. Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования: учеб.пособие / Н.А.Баркова, Ю.С. Дорошев. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. - 157 с.

10 Руссов, В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Русов. — Пермь, 2012. — 252 с.

11 Латыпова Н. В., Тучинский Л. И. Ряды Фурье: учеб.-метод. пособие. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2011. 80 с.

12 Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. — 360 с.

13 Браташ, О. В. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей / О. В. Браташ, А. П. Калинов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2012/etf/iasynskyi/library/vibro.htm> (дата обращения: 10.06.2013).

14 Приоров А. Л., Волохов В. А., Апальков И. В. Обработка сигналов на основе вейвлет-преобразования: метод. указания. Ярославль: ЯрГУ, 2011. – 44 с.

15 Дороничев А. В. Совершенствование вибродиагностики подшипников качения тяговых электрических машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Хабаровск, 2012. 165 с.ф

16 Современные микроконтроллеры: Архитектура, средства проектирования, примеры применения, ресурсы сети интернет. Под ред. Коршунова И.В. - М: «Аким», 1998. - 272 с.

17 Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC. М.: Мир, 1992. - 589 с.

18 Analog devices. Low-cost $\pm 2g$ Dual-Axis Ac-celerometer with Duty Cycle Output ADXL-202E.2000

19 ГОСТ Р 51330.10-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искро-безопасная электрическая цепь. Госстандарт России. Москва, 1999. – 14 с.

20 Аристов П.А., Громов А.Н., Курносов Н.М. и др. Аппаратно-программное обеспечение нового поколения интеллектуальных полевых приборов технологии Fieldbus - Foundation. // Датчики и системы, 2001. №11.

21 Парасына А.С., Толушкин Г.С., Такшин И.А., Машков Д.В. Интеллектуальные датчики вибрации типа ИЦФР // Датчики и детекторы для АЭС «ДДА-ЭС-2004»: Сборник докладов научно-технической конференции - Пенза: ФГУП «НИИ физических измерений», 2004 г. - 298 стр.

22 Ицкович Э.Л. Современные интеллектуальные датчики общепромышленного назначения, их особенности и достоинства. // Датчики и системы, 2002. №2.