ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПНСТ 168— 2016/ ISO/DIS 13373-9

Контроль состояния и диагностика машин

ВИБРАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАШИН

Часть 9

Методы диагностирования электродвигателей

(ISO/DIS 13373-9, IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2017

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АО «НИЦ КД») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 183 «Вибрация, удар и контроль технического состояния»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 ноября 2016 г. № 90-пнст

4 Настоящий стандарт идентичен проекту международного стандарта ISO/DIS 13373-9 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 9. Методы диагностирования электродвигателей» (ISO/DIS 13373-9 «Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 9: Diagnostic techniques for electric motors», IDT).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные и межгосударственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта и проведения его мониторинга установлены в ГОСТ Р 1.16—2011 (разделы 5 и 6).

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии собирает сведения о практическом применении настоящего стандарта. Данные сведения, а также замечания и предложения по содержанию стандарта можно направить не позднее чем за девять месяцев до истечения срока его действия разработчику настоящего стандарта по адресу: 603950 г. Нижний Новгород, Московское ш., д. 213а и в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии по адресу: 109074 Москва, Китайгородский проезд, д. 7, стр. 1.

*В случае отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячных изданиях: информационном указателе «Национальные стандарты» и журнале «Вестник Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии». Уведомление также будет размещено на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, 2017

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Измерения 2
5 Начальный этап анализа 3
6 Анализ специфических неисправностей электродвигателей 3
Приложение А (рекомендуемое) Структурный подход к анализу вибрации электродвигателей 4
Приложение В (рекомендуемое) Методология вибрационного диагностирования электродвигателей . 9
Приложение С (справочное) Примеры из практики анализа вибрации электродвигателей 15
Приложение D (справочное) Выявление и анализ неисправностей на основе модельного подхода к описанию токов и напряжений 21
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным и межгосударственным стандартам 23
Библиография 24

Введение

Настоящий стандарт устанавливает процедуры, применяемые при вибрационном диагностировании электродвигателей. Эти процедуры включают в себя анализ структурных схем диагностирования, таблиц процессов и неисправностей и обобщены в виде логически структурированной последовательности шагов по диагностированию машин данного вида.

В ИСО 13373-1 представлены основные процедуры, используемые при анализе вибрационных сигналов в целях контроля состояния. Они включают в себя выбор преобразователей и мест их размещения, а также диапазона частот измерений для машин разных видов, выбор вида контроля вибрации (непрерывного или периодического), анализ потенциальных проблем в работе машины.

В ИСО 13373-2, который является вводным руководством к диагностированию, рассмотрены такие аспекты, как характеристики системы формирования сигнала, методы представления сигнала вибрации во временной и частотной областях, характерные формы сигналов и признаки, которым могут быть поставлены в соответствие типичные неисправности или особенности работы машины.

В ИСО 13373-3 установлены общие процедуры, применяемые при вибрационном диагностировании машин вращательного действия разных видов. Этими процедурами реализован структурированный подход к диагностированию, который включает в себя описание вибрации машины в качестве исходного материала для диагностирования, перечень инструментов диагностирования, выбор соответствующего инструмента для конкретного приложения и рекомендации по применению данного инструмента в разных приложениях. Вместе с тем, процедуры, изложенные в ИСО 13373-3, не исключают возможность применения других подходов к диагностированию.

Следует отметить, что согласно ИСО 17359 процедуры диагностирования могут:

- последовать за обнаружением в ходе обычных процедур контроля состояния отклонений в поведении машины;
- проводиться параллельно процедурам контроля состояния.

В настоящем стандарте рассмотрена только первая из двух вышеуказанных возможностей. В качестве основных инструментов в нем представлены структурные схемы и таблицы процессов диагностирования в сочетании с таблицами неисправностей, поскольку данный подход имеет давний опыт применения и хорошо зарекомендовал себя на практике.

Применение схем и таблиц процессов диагностирования отражает применение структурированного подхода к диагностированию, позволяющего с высокой степенью надежности обнаруживать неисправности электродвигателей и устанавливать причины их появления. Таблицы неисправности представляют собой перечень наиболее типичных неисправностей электродвигателей в сочетании с соответствующими вибрационными диагностическими признаками. Эти таблицы используют как вспомогательный инструмент для идентификации неисправности в рамках реализации структурного подхода.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Контроль состояния и диагностика машин

ВИБРАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАШИН

Часть 9

Методы диагностирования электродвигателей

Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration condition monitoring.
Part 9. Diagnostic techniques for electric motors

Срок действия — с 2017—12—01
до 2020—12—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает процедуры, применяемые при вибрационном диагностировании электродвигателей, в рамках структурного подхода к диагностированию, установленного в ИСО 13373-3. Настоящий стандарт распространяется на электродвигатели следующих типов: асинхронный с короткозамкнутым ротором, асинхронный с фазным ротором, синхронный явнополюсный и постоянного тока.

Примечание — Методы диагностирования электродвигателей двух первых типов рассмотрены в ИСО 20958.

Применение установленных процедур дополнено примерами неисправностей, характерных для электродвигателей, и способов их диагностирования.

В ряде случаев процедуры, установленные настоящим стандартом, могут быть применены для электрических машин других видов, таких как электрогенераторы. Однако в общем для электрической машины каждого вида существуют свои специфические приемы диагностирования, которые в настоящем стандарте не рассматриваются.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ISO 1925[1)] Mechanical vibration — Balancing — Vocabulary (Вибрация. Балансировка. Словарь)

ISO 2041 Mechanical vibration, shock and condition monitoring — Vocabulary (Вибрация, удар и контроль состояния. Словарь)

ISO 7919-1 Mechanical vibration of non-reciprocating machines — Measurements on rotating shafts and evaluation criteria — Part 1: General guidelines (Вибрация машин без возвратно-поступательного движения. Измерения на вращающихся валах и критерии оценки. Часть 1. Общее руководство)

ISO 10816-1 Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 1: General guidelines (Вибрация. Контроль вибрационного состояния машин по измерениям вибрации на невращающихся частях. Часть 1: Общее руководство)

ISO 13372 Condition monitoring and diagnostics of machines — Vocabulary (Контроль состояния и диагностика машин. Словарь)

[1)] После пересмотра данному международному стандарту будет присвоен номер ИСО 21940-2.

Издание официальное

ISO 13373-1 Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 1: General procedures (Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния. Часть 1. Общие методы)

ISO 13373-2 Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data (Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации)

ISO 13373-3:2015 Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 3: Guidelines for vibration diagnosis (Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния. Часть 3. Руководство по диагностированию по параметрам вибрации)

ISO 20958 Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Electrical signature analysis of three-phase induction motors (Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ИСО 1925, ИСО 2041, ИСО 13372 и ИСО 20958, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **якорь двигателя постоянного тока** (DC armature): Ротор в виде пластинчатого сердечника с уложенной в его пазы двухслойной обмоткой возбуждения, концы которой соединены с коммутатором (коллектором) для питания постоянным током через щетки электродвигателя.

3.2 **явнополюсный ротор** (salient-pole rotor): Вал с выступающими полюсами, сплошными или пластинчатыми, с обмоткой возбуждения на каждом полюсе.

Примечание — Обмотки полюсов соединены друг с другом и с контактными кольцами или бесщеточным возбудителем, через которые осуществлено питание постоянным током.

3.3 **частота питания (электродвигателя)** (supply frequency): Частота тока в цепи питания двигателя переменного тока.

Примечание — Часто также называют «сетевая частота».

3.4 **частота скольжения (ротора асинхронного двигателя)** (slip frequency): Разность между частотой изменения магнитного потока статора и частотой вращения ротора.

3.5 **число полюсов статора** (number of stator poles): Величина, определяемая как $\frac{2n_{syn}}{60f_{supp}}$,

где n_{syn} — синхронная скорость двигателя, мин$^{-1}$;

f_{supp} — частота питания, Гц.

Примечание — Число пар полюсов статора в два раза меньше числа его полюсов.

3.6 **частота прохождения полюсов (асинхронного двигателя)** (pole passing frequency): Произведение частоты скольжения ротора на число полюсов статора.

3.7 **частота прохождения пазов статора** (stator slot passing frequency): Произведение частоты вращения ротора на число пазов статора.

3.8 **частота прохождения пазов ротора** (rotor slot passing frequency): Произведение частоты вращения ротора на число пазов ротора.

3.9 **частота прохождения стержней ротора** (rotor bar passing frequency): Произведение частоты вращения ротора на число стержней беличьей клетки ротора.

4 Измерения

4.1 Измерения вибрации

Измерения вибрации выполняют с применением преобразователей двух основных типов:

- бесконтактного (индуктивных, емкостных, вихретоковых) для измерений вибрации вала;
- инерционного (сейсмического) для измерений на конструктивно неподвижных частях машины, таких как подшипниковая опора.

Существует ряд нормативных документов, посвященных оценке вибрации с использованием двух указанных видов измерений, в частности стандарты серий ИСО 7919 и ИСО 10816. Руководство по выбору соответствующего стандарта приведено в [2].

Для определения неисправности электродвигателя важно сделать правильный выбор преобразователя, устройства согласования, методов получения и обработки данных измерений. Например, при идентификации проблем, связанных с ротором, важно обеспечить высокое разрешение в спектре вибрации, чтобы увидеть составляющую на частоте скольжения. В ряде случаев перед проведением измерений вибрации следует рассмотреть условия заземления и электрические поля машины.

Руководство по выбору преобразователей, систем и методов измерений приведено в ИСО 13373-1 и ИСО 13373-2.

4.2 Измерения рабочих характеристик машины

Вибрация машины и соответствующие диагностические признаки в значительной степени зависят от конструкции машины и способа ее установки (например, горизонтального или вертикального расположения вала, жесткого или податливого основания) и текущих значений рабочих характеристик машины, что необходимо учитывать при проведении диагностирования. Поэтому наряду с измерениями вибрации необходимо измерять также такие характеристики, как скорость вращения ротора, приложенная нагрузка, температура и т. п. Указанные характеристики определяют, работает ли машина в установившемся или переходном режиме.

5 Начальный этап анализа

Начальный этап анализа проводят в соответствии с руководством, изложенным в ИСО 13373-3:2015 (приложение А). На нем рассматривают вопросы безопасности, связанные с работой машины, ее вибрационное состояние, тренд контролируемых параметров, влияние рабочих характеристик, а также возможные решения в отношении продолжения работы машины и их последствия. При проведении анализа учитывают такие факторы, как особенности установки электродвигателя, его расположение относительно других машин вращательного действия, конструкцию помещения, условия окружающей среды и пр. Ряд неисправностей общего вида, связанных с установкой машины и ее подшипниками, рассмотрены в ИСО 13373-3:2015 (приложения B—D).

6 Анализ специфических неисправностей электродвигателей

Электродвигатели используют в качестве устройства привода во многих промышленных и бытовых машинах и агрегатах, таких насосы, вентиляторы, компрессоры. В настоящем стандарте приведена диагностическая информация в отношении электродвигателей наиболее распространенных видов: асинхронных, синхронных и двигателей постоянного тока. Диагностические признаки для основных неисправностей, приводящих к повышению вибрации, приведены в приложении А. Вместе с тем, в приложении А не рассматривают неисправности, связанные с механическими ослаблениями в опоре, гидродинамическими подшипниками и подшипниками качения, в отношении которых следует обращаться к ИСО 13373-3:2015 (приложения С и D). В приложении В приведена общая методология диагностирования электродвигателей, а в приложении С — примеры из практики.

Использование невибрационных характеристик, таких как электрическое напряжение и сила тока, для выявления и анализа неисправностей, приводящих к изменению вибрации электродвигателя, рассмотрено в приложении D.

Приложение А
(рекомендуемое)

Структурный подход к анализу вибрации электродвигателей

В отношении электродвигателей структурный подход к диагностированию, установленный ИСО 13373-3:2015, применяют с использованием таблицы неисправностей, приведенной в таблице А.1.

Примечание — Теоретические основы вибрационного диагностирования электродвигателей с указанием соответствий разным неисправностям характерных частотных составляющих и других диагностических признаков изложены в [3] и [4].

Таблица А.1 — Таблица неисправностей для анализа вибрации электродвигателей

Дефект	Условия изменения вибрации	Скорость изменения вибрации	Основные частотные составляющие	Последующие изменения вибрации	Влияние на критическую частоту	Влияние отключения питания	Повторяемость	Примечания
Ослабление крепления обмотки статора (синхронный двигатель)	Обычно постепенно изменяется со временем	Медленный рост	Частота, равная произведению частоты вращения на число катушек, и боковые полосы, отстоящие на частоту вращения	Растет со временем	Нет	Резкое снижение вибрации	Высокая	При использовании технологии вакуумного прессования встречается редко
Изгиб конца вала	Обычно после повреждения приводного оборудования или больших радиальных нагрузок	Быстрое изменение	Обычно частота вращения, также 2-я гармоника частоты питания с модуляцией на 2-й гармонике частоты скольжения (в двухполюсных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором)	Если дефект обусловлен большой радиальной нагрузкой на конец ротора, то вибрация может расти со временем и изменяться с нагрузкой	Нет	Некоторое падение вибрации вначале с последующим медленным уменьшением	Существует зависимость от нагрузки и температуры	Диагноз может быть подтвержден измерениями биения конца вала
Отклонение положения ротора от магнитного центра	После установки двигателя или выравнивания оси ротора с приводным оборудованием	Зависит от величины отклонения	1-я, 2-я и 3-я гармоники частоты вращения в осевом направлении (в радиальном вибрация много ниже)	Может изменяться с нагрузкой	Нет	Резкое снижение вибрации	Существует зависимость от нагрузки и температуры	Высокая вибрация у двигателей с радиальными вентиляционными каналами в статоре и роторе
Трещины или разрывы в стержнях «беличьей клетки»	После пуска двигателя (если только дефект не вызван пустотами при литье стержней)	Медленное изменение, если дефект возник при изготовлении	1-я гармоника частоты вращения с боковыми полосами, отстоящими на частоту скольжения, умноженную на число полюсов, а также гармоники этих частот. Могут наблюдаться изменения и повышение с ростом нагрузки вибрации	С ростом числа обрывов вибрация возрастает. Одновременно растет вибрация, обусловленная дисбалансом и температурным прогибом ротора	Изменяет частотную характеристику	Резкое снижение вибрации	Существует зависимость от числа разрывов	Наблюдается шум двигателя при пуске, а время пуска увеличивается вследствие уменьшения крутящего момента двигателя. Дефект может быть подтвержден сигнатурным

Продолжение таблицы А.1

Дефект	Условия изменения вибрации	Скорость изменения вибрации	Основные частотные составляющие	Последующие изменения вибрации	Влияние на критическую частоту	Влияние отключения питания	Повторяемость	Примечания
			на частоте, равной частоте скольжения, умноженной на число полюсов. Также возможна осевая вибрация на 4-й гармонике частоты вращения					анализом тока двигателя, а также наличием боковых полос у частоты питания, отстоящих от нее на удвоенную частоту скольжения
Ослабление крепления стержней «беличьей клетки»	Если это не связано с дефектом изготовления, то обычно начинает проявляться спустя некоторое время после начала эксплуатации двигателя	Медленное изменение (если неисправность возникла во время эксплуатации)	Боковые полосы, отстоящие на удвоенную частоту питания, для 1-й, 2-й и 3-й гармоник частоты прохождения пазов ротора	Вибрация возрастает со временем и может изменяться с изменением нагрузки по мере увеличения числа ослабленных креплений	Изменяет с нагрузкой	Пропадают гармоники частоты прохождения пазов ротора. При снижении скорости может внезапно исчезнуть составляющая, обусловленная дисбалансом	Высокая	Сильное ослабление креплений наряду с температурным прогибом ротора могут вызвать значительный механический дисбаланс у высокоскоростных двигателей
Неуравновешенные напряжения питания	Определяют при постоянной нагрузке	Зависит от степени неуравновешенности	Вибрация в радиальном направлении на удвоенной частоте питания с боковыми полосами, отстоящими на 1/3 частоты питания. Возможны биения амплитуды	Вибрация повышается с увеличением рассогласования напряжений	—	Быстрое снижение вибрации (если только рабочая частота вращения не находится выше критической)	Может быть низкой, если неуравновешенность обусловлена ослаблениями в соединениях	Неуравновешенность может быть связана с небалансом напряжений сети или с ослаблениями соединений на клеммах электродвигателя
Трещина вала ротора	Определяют при постоянной нагрузке	При зарождении дефекта уровень вибра-	1-я, 2-я и 3-я гармоники радиальной вибрации. В зависимости от вида	Амплитуда 1-й гармоники экспоненциально растет	Возможно уменьшение и расщепление критической	Вначале возможно резкое снижение вибрации из-за	Может быть низкой	Изменения вибрации в установившемся режи-

Продолжение таблицы А.1

Дефект	Условия изменения вибрации	Скорость изменения вибрации	Основные частотные составляющие	Последующие изменения вибрации	Влияние на критическую частоту	Влияние отключения питания	Повторяемость	Примечания
		ции изменяется медленно	трещины может наблюдаться осевая вибрация	со временем, а 2-й — снижается	частоты вращения	отсутствия магнитного взаимодействия между ротором и статором с последующим медленным уменьшением		ме могут быть незначительными. Всплеск вибрации может наблюдаться при прохождении резонанса во время выбега, что приводит к росту повреждения. Следует контролировать тренд гармонических составляющих и сравнивать с предыдущими записями амплитуд 1-й и 2-й гармоник
Близость рабочей и критической частот вращения	Определяют в нормальных рабочих условиях, а также при прохождении через критическую частоту	Проявляется сразу	1-я гармоника частоты вращения (в основном в радиальном направлении)	Маловероятны	—	Быстрое снижение вибрации (если только рабочая частота вращения не находится выше критической)	Высокая	Дефект проще обнаружить по измерениям перемещения вала
Близость рабочей частоты вращения к резонансу корпуса	Определяют в нормальных рабочих условиях, а также при прохождении через критическую частоту	Проявляется сразу	1-я гармоника частоты вращения в радиальном или осевом направлении (доминирует в одной плоскости)	Маловероятны	—	Быстрое снижение вибрации (если только рабочая частота вращения не находится выше критической)	Высокая	Дефект проще обнаружить по измерениям перемещения вала

Окончание таблицы А.1

Дефект	Условия изменения вибрации	Скорость изменения вибрации	Основные частотные составляющие	Последующие изменения вибрации	Влияние на критическую частоту	Влияние отключения питания	Повторяемость	Примечания
Межвитковые замыкания явно полюсного ротора	Определяют при постоянной нагрузке	Проявляется сразу	Частота, равная произведению частоты вращения на число полюсов. Амплитуда пропорциональна числу короткозамкнутых витков и току возбуждения. Вибрация преимущественно в радиальном направлении	Возрастает с увеличением числа короткозамкнутых витков	Может измениться из-за повышения радиальной нагрузки вследствие нарушения симметрии магнитного поля	Резкое снижение вибрации	Высокая	Иногда выявление неисправности затруднено из-за ее перемежающегося характера (может исчезать под действием центробежных сил при вращении ротора)
Ослабление крепления полюсов явно полюсного ротора	Определяют при постоянной нагрузке, а также во время пуска и останова	Может медленно изменяться со временем	Частота, равная произведению частоты вращения на число полюсов, с боковыми полосами, отстоящими на частоту вращения. Вибрация преимущественно в радиальном направлении	Возрастает по мере дальнейшего ослабления крепления	Критическая частота может измениться	Медленно спадает с замедлением вращения ротора	Высокая	—
Разрывы в обмотке возбуждения и ослабления соединений в двигателе постоянного тока	Определяют при постоянной нагрузке	Может медленно изменяться со временем	Обычно проявляется на частоте, в шесть раз большей частоты коммутации тока в твердотельном выпрямителе. Вибрация преимущественно в радиальном направлении	Может возрастать по мере ослабления соединений	—	Резкое снижение вибрации	Высокая	—
Несоосность соединения с приводным оборудованием	См. ИСО 13373-3:2015 (приложение В)							

Приложение В
(рекомендуемое)

Методология вибрационного диагностирования электродвигателей

В.1 Схемы вибрационного диагностирования

Схемы вибрационного диагностирования электродвигателей показаны на рисунках В.1—В.4.

Примечание — Аббревиатура ODS обозначает «форма изгибных колебаний работающей машины».

В.2 Описание методологии

В.2.1 Общие положения

Общие рекомендации по методологии диагностирования эксплуатируемых электродвигателей проиллюстрированы рисунками В.1—В.4. Процесс включает в себя в качестве основного элемента этапы визуального контроля, спектрального анализа [3] и испытания на резонанс. В дополнение к ним при необходимости используют анализ временного сигнала и фазовых соотношений, а также ODS-анализ. В случае электродвигателей характерным приемом для выявления причин повышенной вибрации является отключение питания (см. таблицу А.1).

В.2.2 Визуальный контроль

Перед проведением любых испытаний работающего электродвигателя рекомендуется сначала провести его визуальный осмотр. Часто такие проблемы, как ослабление соединений с опорой или фундаментом или повышенные механические напряжения из-за деформации подсоединенного трубопровода, могут быть обнаружены невооруженным глазом. Предполагается, что прежде, чем перейти к обследованию машины, все болтовые соединения двигателя с основанием должны быть затянуты. Также следует проверить соединение всех трубопроводов. Следует убедиться в надежности и отсутствии перекосов в болтовых креплениях всех фланцевых соединений двигателя со вспомогательными системами (водяного охлаждения, подачи смазки). Определенные неисправности двигателя могут сопровождаться специфическим акустическим шумом во время пуска или при работе в нормальном режиме. Наличие такого шума должно быть зарегистрировано.

В.2.3 Спектральный анализ

Спектральный анализ является ключевой процедурой диагностирования машин вращательного действия (см. рисунки С.1, С.2, С.4, С.6 и С.7). Обычно анализируемой величиной является скорость вибрации, но могут быть также использованы ускорение в случае высокоскоростных машин или перемещение для низкоскоростных машин и компрессоров. Кроме того, с помощью бесконтактного датчика вибрации получают сигнал перемещений вала, который может быть полезен при анализе радиальных резонансных колебаний ротора или состояния гидродинамических подшипников.

Сигнал вибрации для анализа снимают со всех подшипников в трех ортогональных направлениях: вертикальном, осевом и горизонтальном. Чтобы определить характерные частоты, на которых проявляются неисправности, надо знать тип конструкции и характер работы электродвигателя. В частности, важно знать тип обмотки ротора, поскольку разные типы обмотки имеют свои повреждения, которым соответствуют свои характерные частотные составляющие спектра вибрации. Целью анализа является выявление вибрации на частотах, характерных для тех или иных неисправностей. Если амплитуда всех составляющих не превышает заданных пределов, то работу машины считают нормальной. В противном случае необходимо связать выделяющиеся составляющие с характерными частотами машины, которыми в случае электродвигателей являются частота вращения ротора и частота питания сети. Следует, однако, иметь в виду, что ряд неисправностей может быть обнаружен по изменениям формы спектра, не обязательно сопровождающимися появлением в нем высокоамплитудных сигналов.

Частоты, на которых наблюдается повышенная вибрация, можно разделить на три группы:

a) 1-я гармоника частоты вращения.

Есть много неисправностей, которые приводят к появлению в спектре вибрации составляющей на частоте вращения вала. Среди них — механический и тепловой дисбалансы ротора, изгиб вала, близость рабочей скорости к критической скорости ротора. Чтобы определить, какая именно из возможных неисправностей имеет место в конкретной ситуации, следует выполнить дополнительные измерения, которые включают в себя определение: временной формы сигнала, фазовых соотношений, форм изгибных колебаний работающей машины;

b) частоты (отличные от первой гармоники), характерные для машин данного вида.

Примером может служить уменьшение амплитуд гармоник частоты вращения ротора. Такое поведение обычно характерно для ослабления механических соединений в подшипниках или опорах машины. У трехфазных двигателей переменного тока может быть обнаружена составляющая вибрации в виде 2-й гармоники частоты питания, причины появления которой рассмотрены в приложении А и разделе В.1;

c) частоты, которые нельзя связать с конкретным видом неисправности.

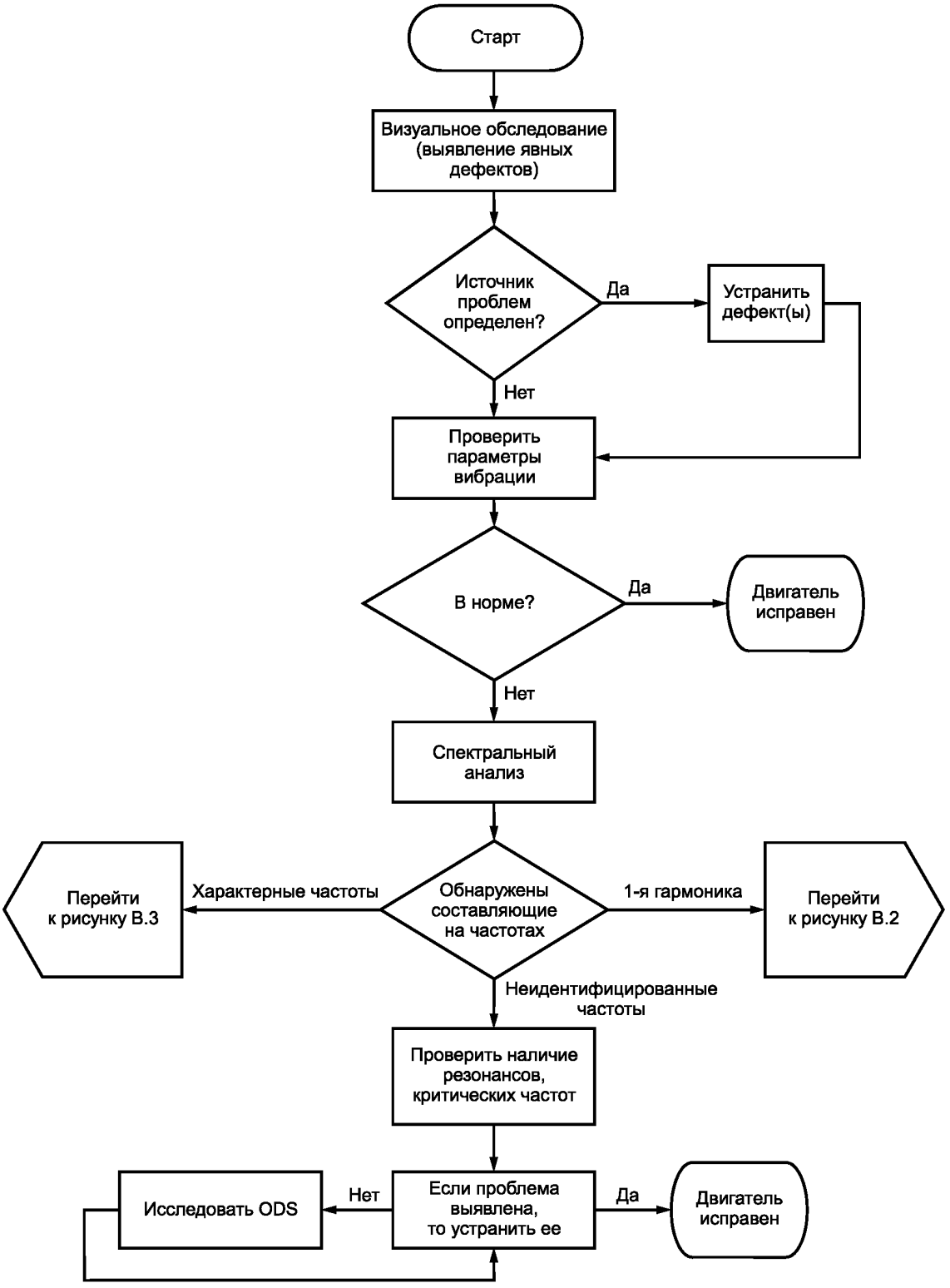


Рисунок В.1 — Структурная схема вибрационного диагностирования электродвигателя. Начальный этап

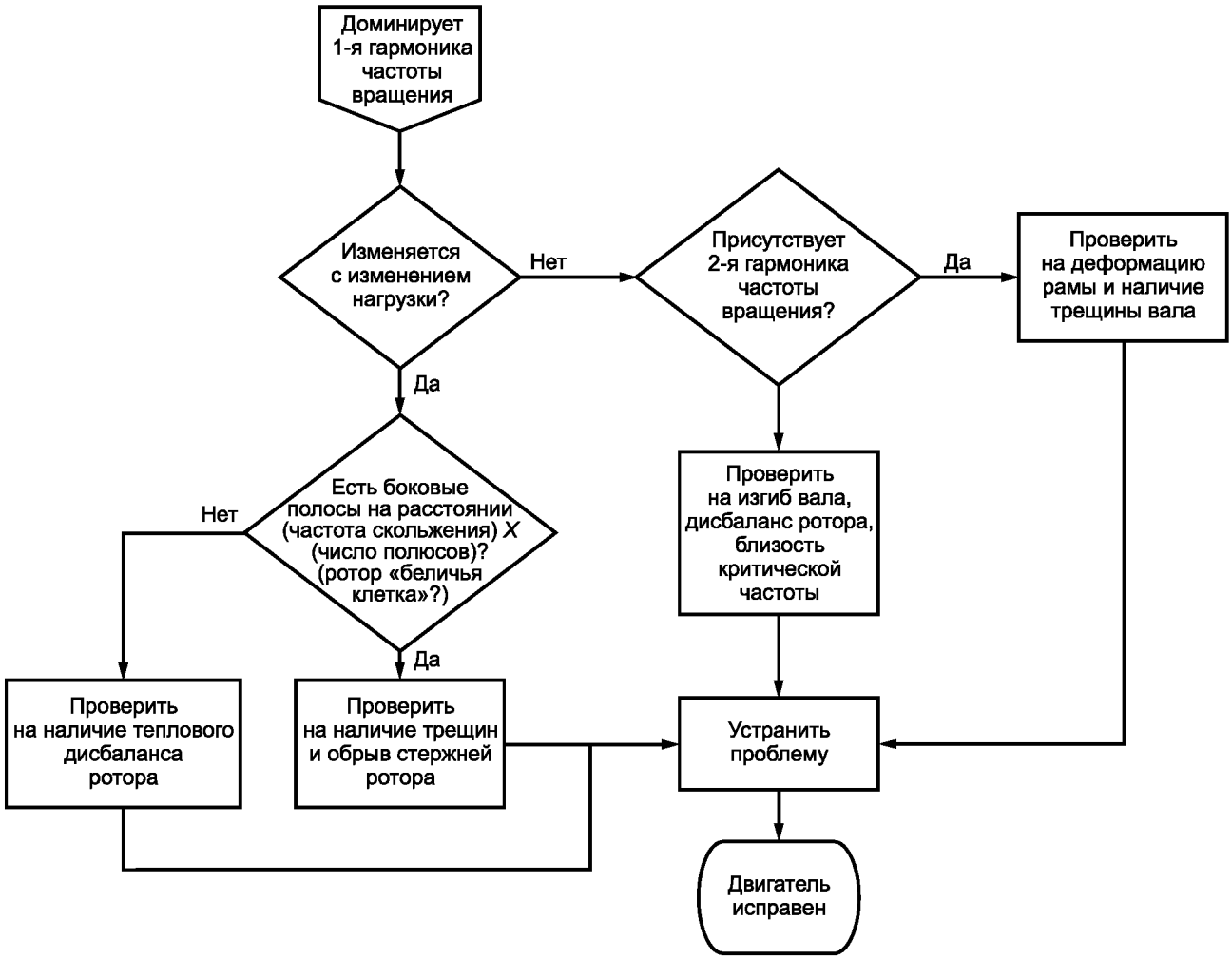


Рисунок В.2 — Структурная схема вибрационного диагностирования электродвигателя. Доминирует 1-я гармоника частоты вращения

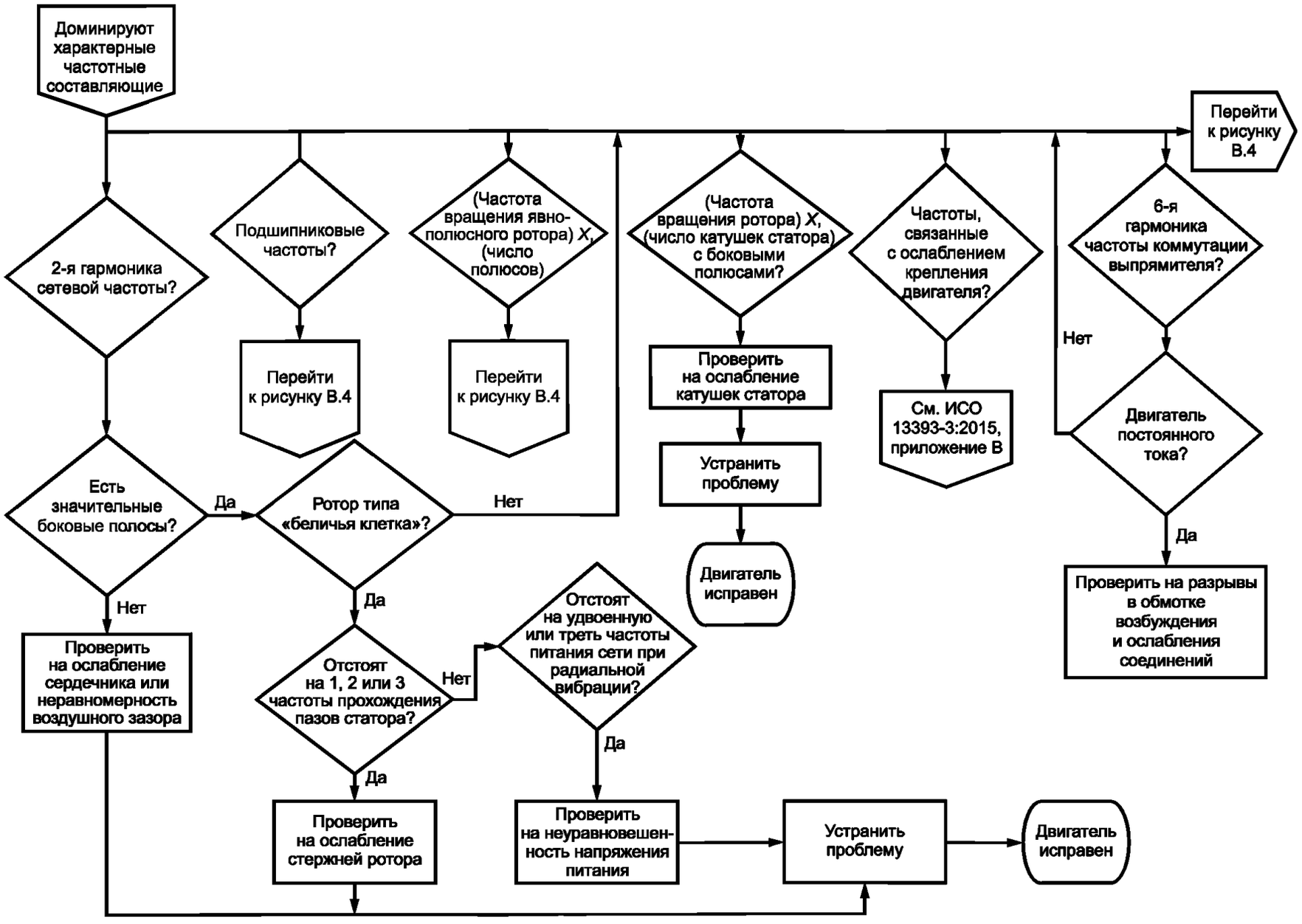


Рисунок В.3 — Структурная схема вибрационного диагностирования электродвигателя. Доминируют составляющие на характерных частотах (часть 1)

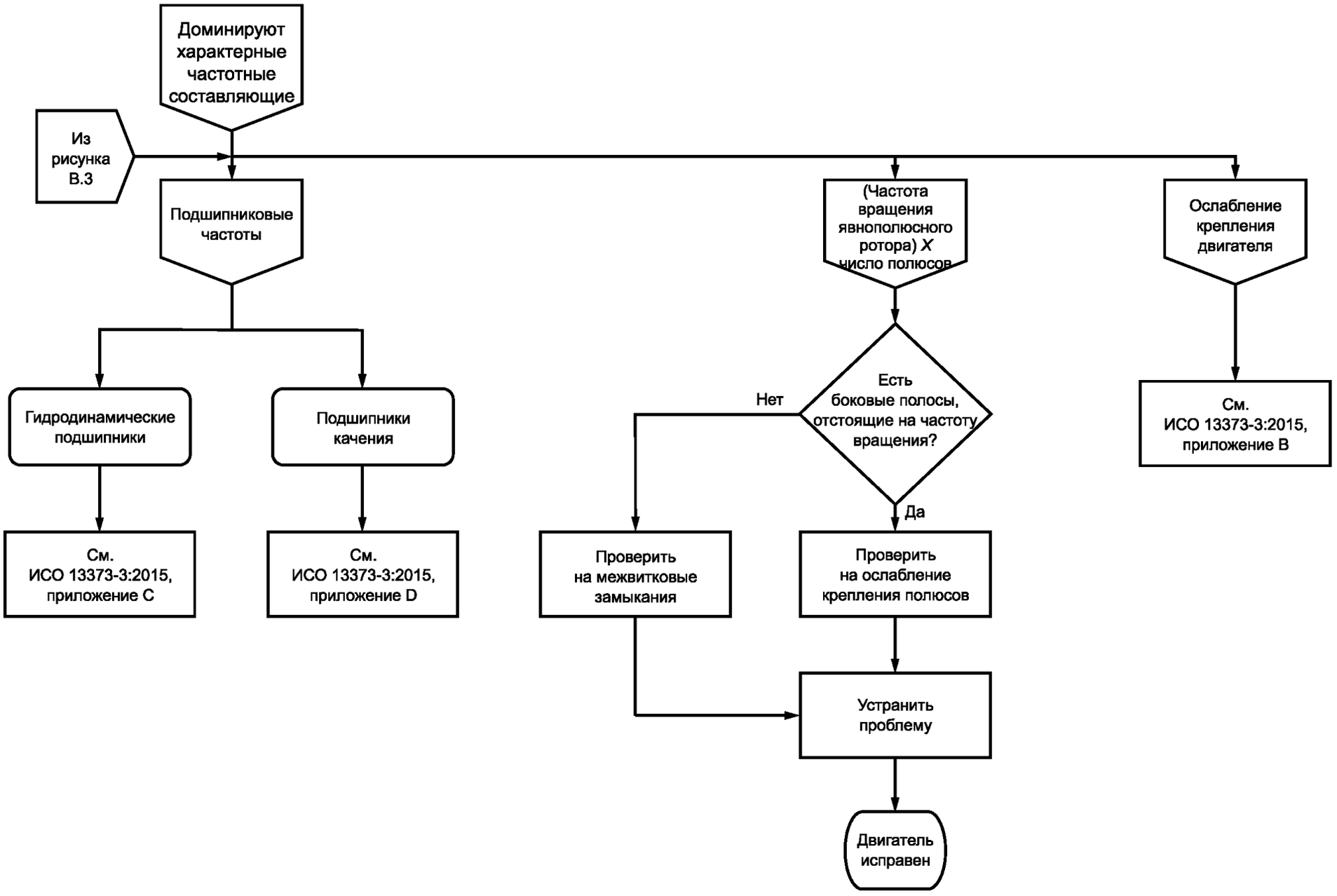


Рисунок B.4 — Структурная схема вибрационного диагностирования электродвигателя. Доминируют составляющие на характерных частотах (часть 2)

В этом случае для определения источника, с которым связаны составляющие на данных частотах, проводят дополнительные исследования. Такие исследования могут включать в себя поиск резонансов [3] (в том числе нанесением ударов по конструкции или измерениями в переходных режимах) и модальный анализ [6]. Целью испытаний на резонанс является попытка связать наблюдаемые частотные составляющие с собственными частотами колебаний конструкции машины или с критическими скоростями ротора. Модальные испытания являются более сложной формой испытаний на резонанс и позволяют помимо собственных частот определять также формы мод и коэффициенты демпфирования. Модальный анализ требует больших временных и финансовых затрат, и по этой причине его редко используют для диагностирования машин, участвующих в производственном процессе. Однако в обоснованных случаях он представляет собой мощный инструмент для описания динамического поведения машины, идентификации частотных составляющих спектра и формирования предложений по корректирующим действиям [6]. Как видно из таблицы А.1 и схем вибрационного диагностирования, показанных на рисунках В.1—В.4, полезными инструментами, помогающими в идентификации неисправностей, являются варьирование нагрузок двигателя и отключение питания.

В.2.4 Анализ временной формы сигнала

Вид временного сигнала вибрации может быть использован, чтобы различить такие неисправности, как несоосность, неравномерный воздушный зазор между ротором и статором, деформация рамы двигателя и дефекты обмотки статора.

В.2.5 Анализ фазовых соотношений

Анализ фазовых соотношений применяют, чтобы различить такие неисправности, как дисбаланс, несоосность, изгиб вала и деформация корпуса. Во многих случаях несоосность (основной вид неисправности, связанной с установкой двигателя на месте его применения) проявляет себя только через 1-ю гармонику частоты вращения. Тогда одним из способов отличить несоосность от проявляющего себя схожим образом дисбаланса является измерение фазы 1-й гармоники в разных точках вдоль места соединения валов. Ниже приведены примеры использования фазовых соотношений в целях диагностирования:

a) если в сигналах, снятых по обе стороны от соединения, фаза изменяется на 180°, то это обычно свидетельствует о наличии несоосности. При отсутствии фазового сдвига в радиальной вибрации можно предположить наличие дисбаланса. Однако следует иметь в виду, что в некоторых случаях на место соединения приходится узел собственных изгибных колебаний валопровода, что может потребовать проведения дополнительного анализа;

b) деформацию корпуса можно определить по сдвигу фаз на 180° вибрации в горизонтальном, вертикальном или осевом направлении на разных концах вала машины;

c) при прохождении через резонанс теоретически фаза сигнала, измеряемого в одной точке, должна резко измениться на 180°. В реальности наличие ненулевого демпфирования и влияние других критических скоростей приводят к тому, что скачок фазы составляет менее 180°.

Перекос подшипника может быть обнаружен по измерениям фазы по окружности подшипника и наблюдениям за ее изменениями вследствие «качания» такого подшипника. Часто сравнительный анализ фаз сигналов первых гармоник позволяет визуализировать вибрацию и облегчает поиск неисправностей.

В.2.6 ODS-анализ

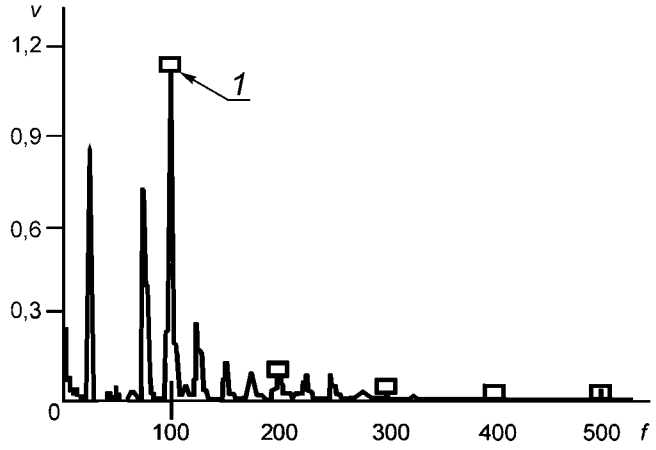
Если проведенные исследования временной формы сигнала и фазовых соотношений все же не позволили установить вид неисправности, приводящей к росту 1-й гармоники частоты вращения, то рекомендуется использовать анализ формы изгибных колебаний работающей машины (ODS-анализ). Он помогает выявить такие проблемы, как наклонный фундамент, разновысокие опоры, механические ослабления в опорах двигателя и резонанс его конструкции (см. рисунки С.7—С.9), а также параллельное и угловое смещение осей сопрягаемых валов. Данный вид анализа требует проведения измерений фазы и амплитуды соответствующей частотной составляющей в узловых точках сетки, нанесенной на поверхность машины или опоры, и позволяет наблюдать форму отклонений под рабочей нагрузкой при рабочих скоростях вращения. Следует отметить, что эта форма не совпадает с модой вибрации машины (если только та не находится в состоянии резонанса), но может рассматриваться как суммарный вклад всех мод на частоте вращения. Визуализация вибрации по поверхности машины (опоры) позволяет выявить проблемы, связанные с установкой машины (см. рисунки С.7—С.9). Так, если наблюдается узел колебаний опоры двигателя, то это является явным признаком разновысоких опор или наклонного фундамента. Чтобы подтвердить этот диагноз, необходимо будет провести точные геометрические измерения на фундаменте и (или) опоре.

Приложение С
(справочное)

Примеры из практики анализа вибрации электродвигателей

С.1 Пример 1 — Неравномерный воздушный зазор

Повышенная вибрация наблюдалась у четырехполюсного 50-герцового асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 75 кВт. В целях поиска причин такой вибрации был построен спектр высокого разрешения (см. рисунок С.1), в котором выделялась составляющая со среднеквадратичным значением скорости v = 1,12 мм/с на частоте 100 Гц. Сигнатурный анализ токов двигателя подтвердил наличие неравномерности зазора между ротором и статором. Выявленная неисправность была устранена, что позволило понизить уровень как широкополосной вибрации, так и составляющей на частоте 100 Гц до приемлемых значений.



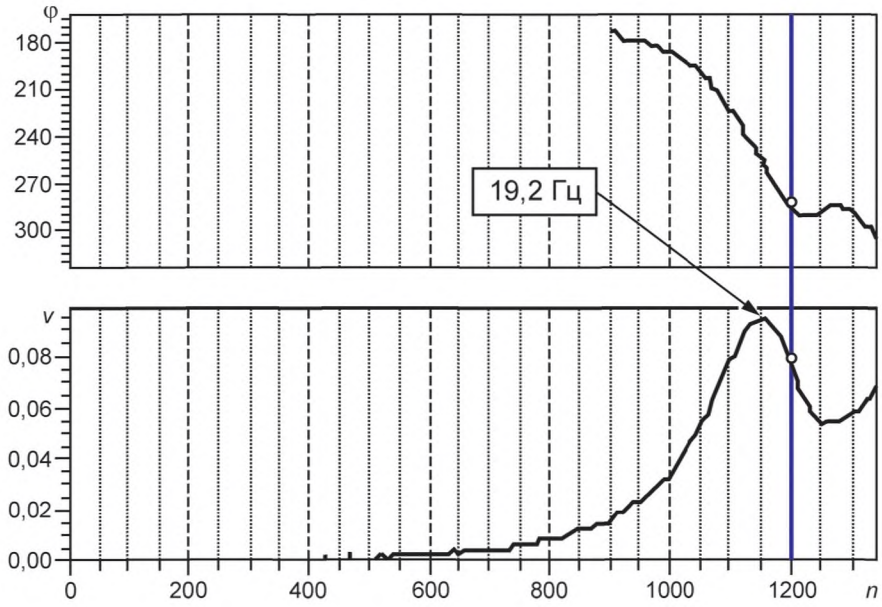
v — среднеквадратичное значение скорости, мм/с; f — частота, Гц; *1* — составляющая вибрации на частоте 100 Гц

Рисунок С.1 — Спектр скорости вибрации электродвигателя при неравномерном зазоре между ротором и статором

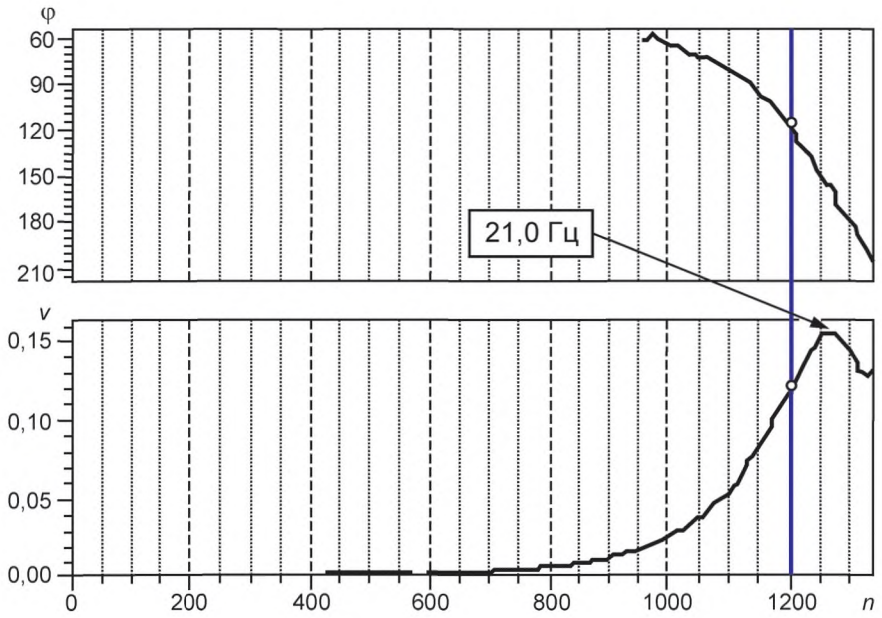
С.2 Пример 2 — Проблема, демонстрируемая язычковым частотомером

Шестиполюсный вертикальный асинхронный двигатель для привода насоса проходил заводские испытания на стенде с массивным жестким фундаментом, в ходе которых было выявлено наличие двух язычковых частот при разной ориентации частотомера, каждая из которых близка к частоте вращения вала двигателя, равной приблизительно 20 Гц (см. рисунок С.2).

Это могло бы вызвать проблемы, если бы при эксплуатации двигатель устанавливали на место с помощью болтового соединения к жесткой опоре. Однако реальная опора двигателя обладала существенно большей податливостью, чем на стенде, и язычковые частоты для обоих направлений вибрации находились гораздо ниже частоты 20 Гц, что позволяло не рассматривать резонансы корпуса конструкции как источник возможных проблем при эксплуатации.



a) На подшипнике в вертикальном направлении



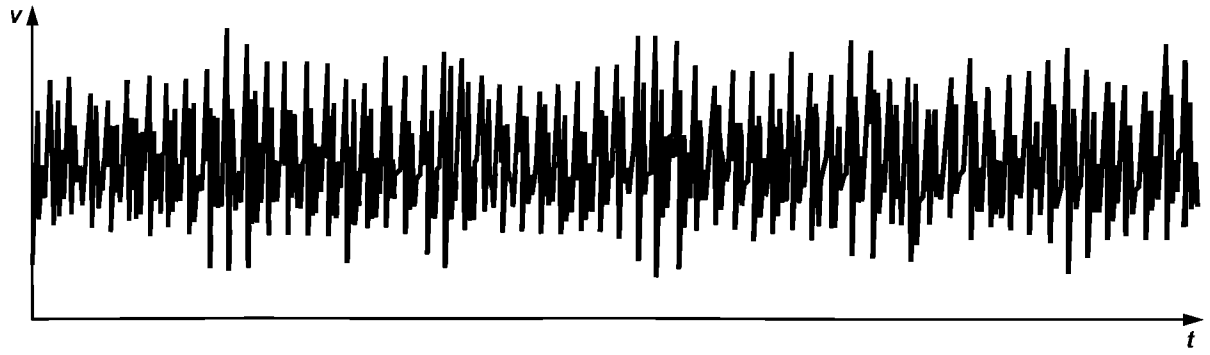
b) На подшипнике в горизонтальном направлении

v — среднеквадратичное значение скорости, мм/с; φ — фаза, град; n — скорость вращения вала, мин$^{-1}$

Рисунок С.2 — Две язычковые частоты с разностью фаз 90°, близкие к частоте вращения вала

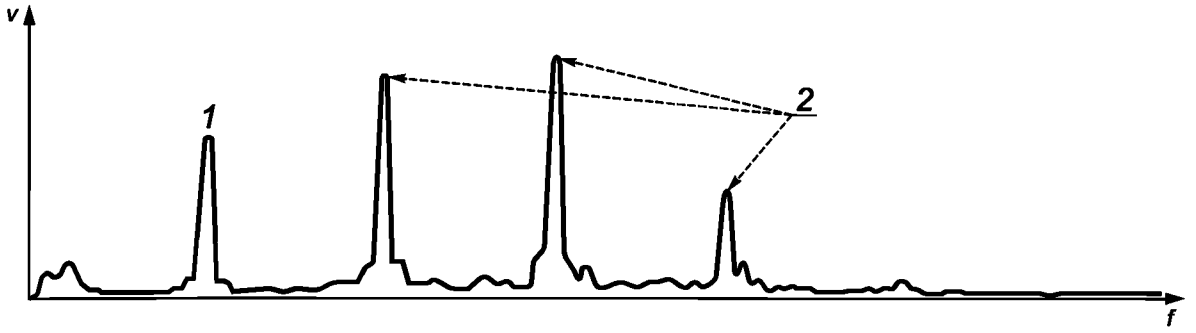
С.3 Пример 3 — Дефект обмотки статора [6]

На рисунке С.3 показан временной сигнал скорости вибрации, полученный для 12-полюсного 60-герцового электродвигателя мощностью 200 кВт с дефектом обмотки статора. Отчетливо видна модуляция сигналом с удвоенной частотой питания (120 Гц), в то время как в спектре (рисунок С.4) выделяются гармоники удвоенной частоты питания. Эти признаки ясно свидетельствуют об указанном дефекте.



v — скорость вибрации; *t* — время

Рисунок С.3 — Временная реализация с модуляцией частотой 120 Гц

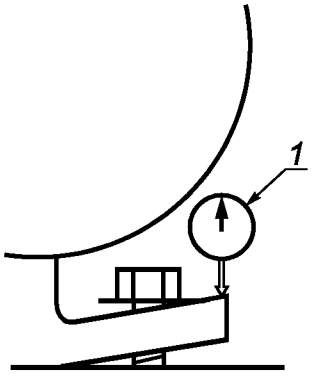


v — амплитуда скорости; *f* — частота; *1* — составляющая на частоте 120 Гц; *2* — составляющие на частотах 240, 360 и 480 Гц

Рисунок С.4 — Спектр с составляющей на частоте 120 Гц и ее гармониками

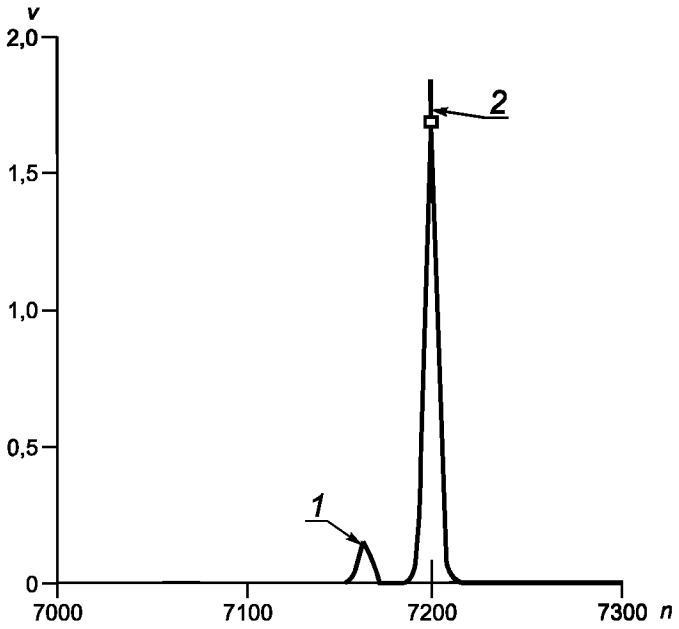
С.4 Пример 4 — Деформация рамы статора [6]

Настоящий пример иллюстрирует причину появления повышенной вибрации двигателя на раме с разновысокими опорами (см. рисунок С.5). Если рама двигателя соединена с опорами через болтовые соединения, то разная высота опор вызывает деформацию рамы, что приводит к перекосу подшипников и несоосности сопрягаемых валов. Следствием последнего, в свою очередь, становится неравномерность воздушного зазора и повышенная вибрация на удвоенной частоте сети (см. спектр на рисунке С.6 с осью абсцисс, проградуированной в единицах скорости вращения). Причину неисправности удалось выявить, поочередно ослабляя болтовые соединения статора с рамой и наблюдая, как изменяется составляющая на удвоенной частоте питания (в данном примере это 120 Гц или 7200 мин$^{-1}$). После ослабления соединения с более низкой опорой, показанной на рисунке С.5, указанная составляющая уменьшилась с 1,867 (см. рисунок С.6) до 0,076 мм/с, как показано на рисунке С.7.



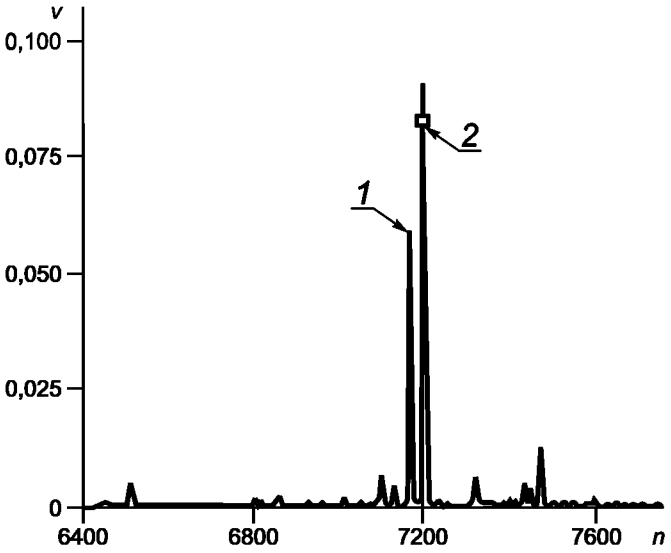
1 — индикатор часового типа

Рисунок С.5 — Опора рамы статора меньшей высоты (по сравнению с другими опорами)



v — пиковое значение скорости, мм/с; *n* — скорость, мин$^{-1}$; *1* — составляющая на удвоенной скорости вращения (7164 мин$^{-1}$); *2* — составляющая на удвоенной частоте питания (120 Гц или 7200 мин$^{-1}$)

Рисунок С.6 — Повышенная вибрация в горизонтальном направлении на удвоенной частоте питания



v — пиковое значение скорости, мм/с; *n* — скорость, мин$^{-1}$; *1* — составляющая на удвоенной скорости вращения (7164 мин$^{-1}$); *2* — составляющая на удвоенной частоте питания (120 Гц или 7200 мин$^{-1}$)

Рисунок С.7 — Спектр вибрации после ослабления болтового соединения низкой опоры с рамой статора

С.5 Пример 5 — ODS-анализ [7]

Обслуживающий персонал обнаружил сильную вибрацию, преимущественно в горизонтальном направлении, шестиполюсного 60-герцового двигателя, служащего приводом поршневого компрессора. Повышенная вибрация привела к преждевременному износу подшипника. Двигатель был установлен на двутавровых балках. Данные ODS на рабочей скорости двигателя (несколько ниже 1200 мин$^{-1}$, что соответствует 20 Гц) показали значительные изгибы в соединениях между опорой двигателя, цементными блоками под опорой и рамой двигателя из двутавровых балок (см. рисунок С.8).

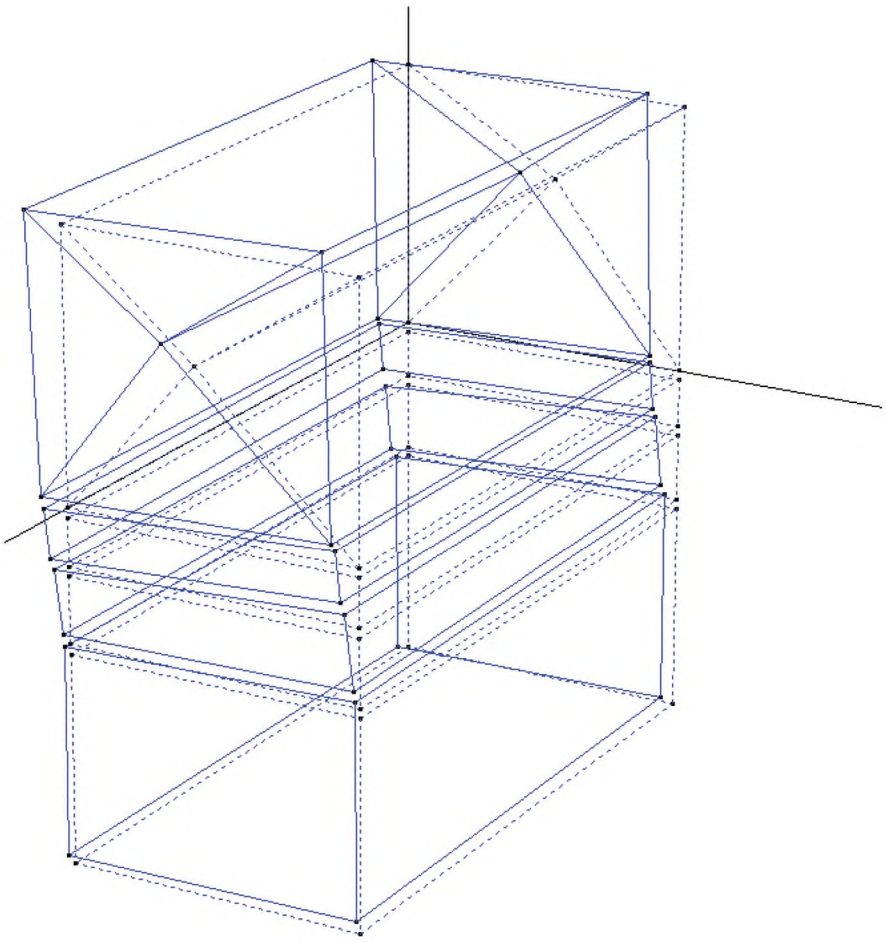
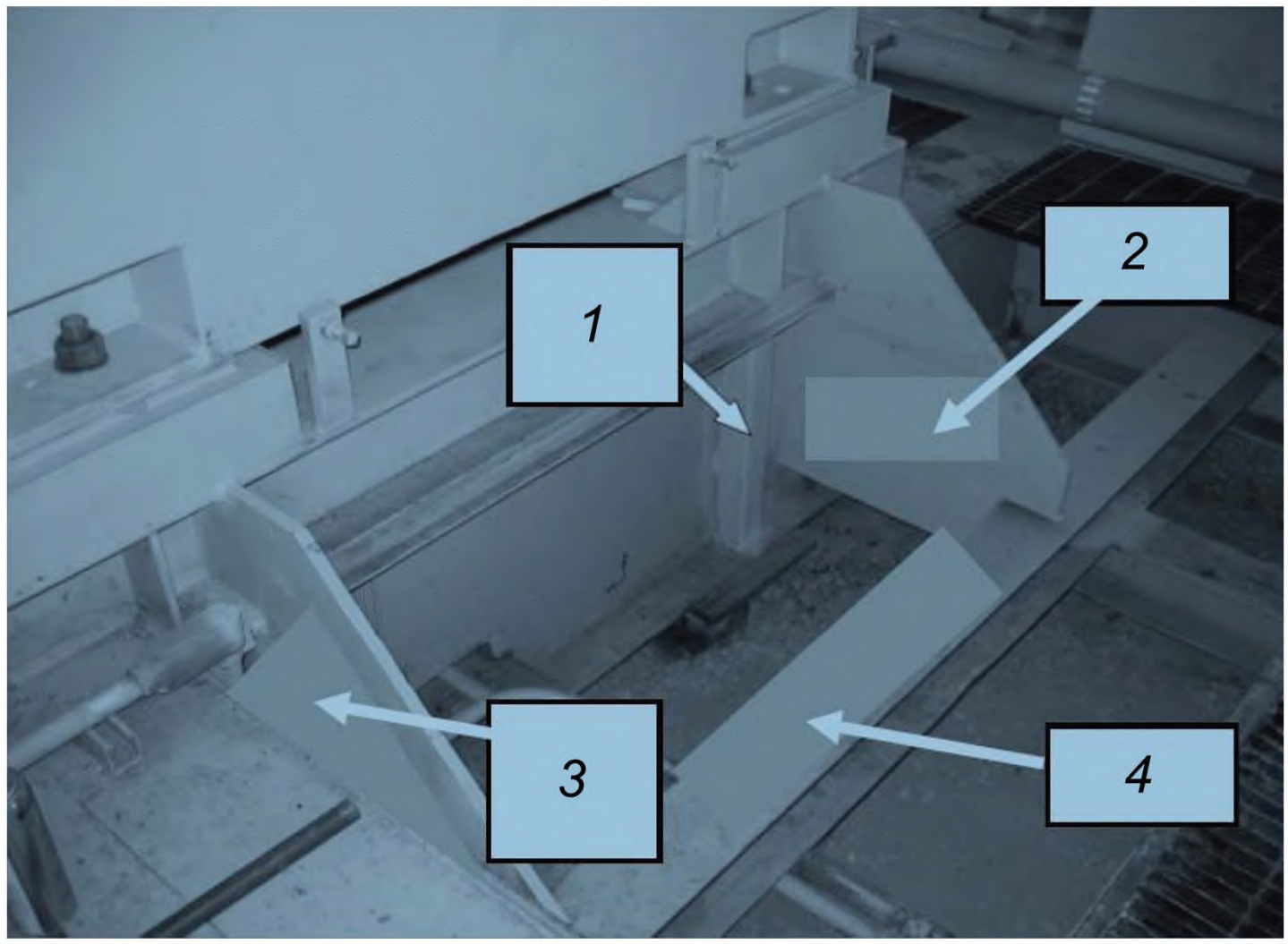


Рисунок С.8 — Начальные данные ODS на частоте около 20 Гц

С целью устранения изгиба к опоре были приварены три пластины жесткости толщиной 19 мм (см. рисунок С.9).

Проведенный после этого повторный ODS-анализ показал существенное снижение вибрации, особенно заметное (более 50 %) в горизонтальном направлении (см. рисунок С.10).



1 — прямоугольная балка; *2*, *3* — элементы жесткости; *4* — двутавровая балка

Рисунок С.9 — Добавление элементов жесткости

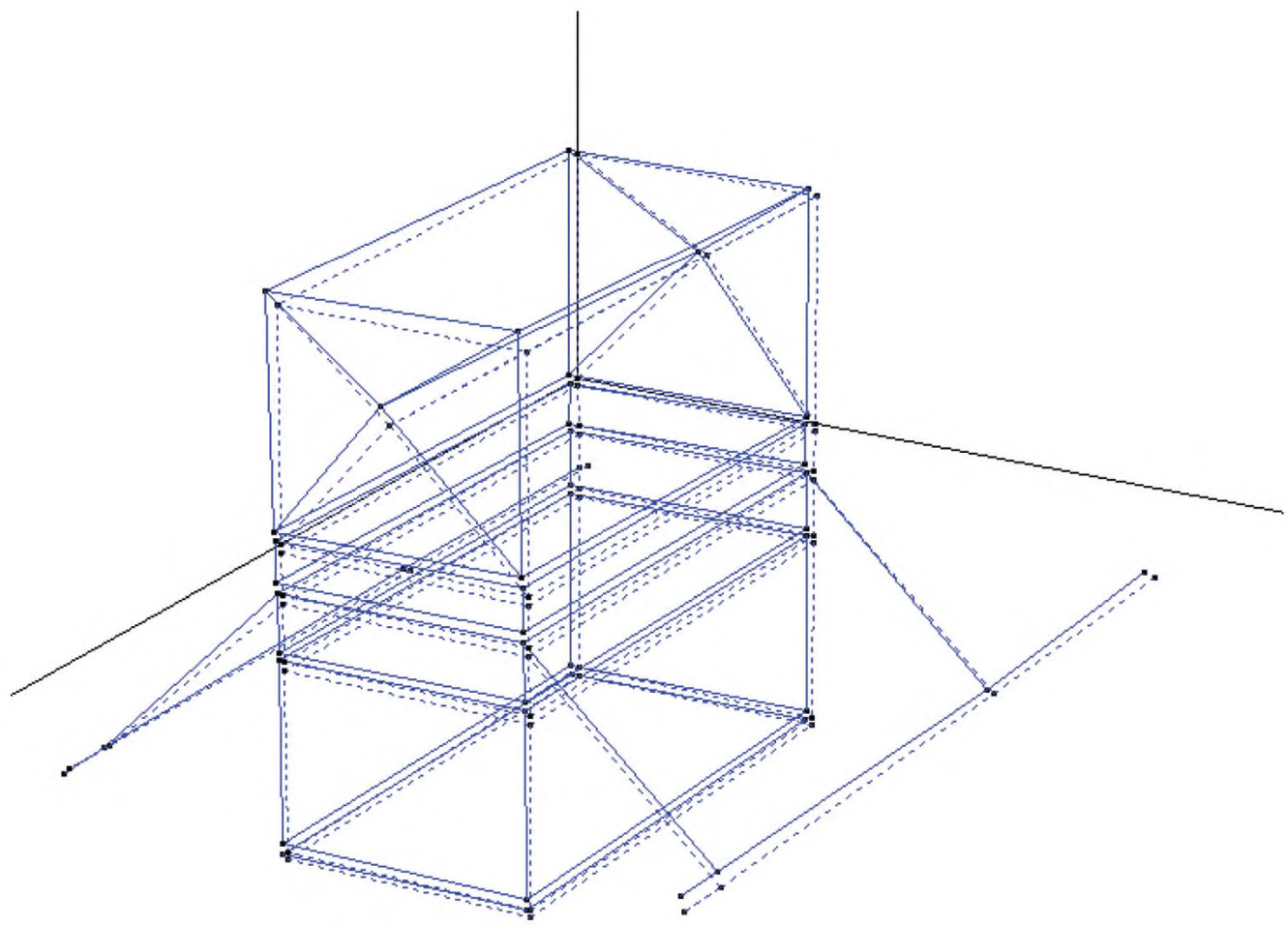


Рисунок С.10 — ODS после приваривания элементов жесткости

Приложение D
(справочное)

Выявление и анализ неисправностей на основе модельного подхода к описанию токов и напряжений

В настоящем стандарте рассмотрены метод диагностирования электродвигателя на основе анализа создаваемой им вибрации. Однако существуют также другие технологии диагностирования, например основанные на сигнатурном анализе электрических сигналов (см. ИСО 20958), которые могут быть использованы для подтверждения результатов анализа вибрации. В ИСО 20958 и настоящем приложении рассмотрены методы выявления неисправностей, определяемых при вибрационном диагностировании, но без использования акселерометров. Эти методы, специфичные для электрических машин, очень близки как по своей природе, так и по целям тем, что применяют при обычном вибрационном анализе.

Предпосылкой для модельного анализа токов и напряжений является то, что на ток в электродвигателе влияют не только входное напряжение, но также процессы, происходящие в самом электродвигателе и в приводном оборудовании. Любое событие, связанное с преобразованием и обменом энергией в машине, находит отражение не только в сигнале вибрации, но схожим образом (на тех же характерных частотах и схожим изменением частотного состава сигнала) также в токе двигателя и может быть обнаружено с помощью соответствующих измерительных устройств.

Модельный анализ тока и напряжения предполагает измерение этих величин во время работы двигателя и сопоставление результатов измерений с данными, полученными на основе математической модели связи между теми же величинами. Так, задавая на входе модели полученные в ходе измерений значения напряжений, получают прогнозируемые значения токов, которые затем сравнивают с результатами их измерений. Разница между прогнозом и результатом измерения указывает на ухудшение качества работы двигателя. Разностный сигнал содержит частотные составляющие, служащие признаками определенных неисправностей. Спектр такого сигнала (см. рисунок D.1) будет очень похож на спектр сигнала, получаемого системой вибрационного контроля состояния.

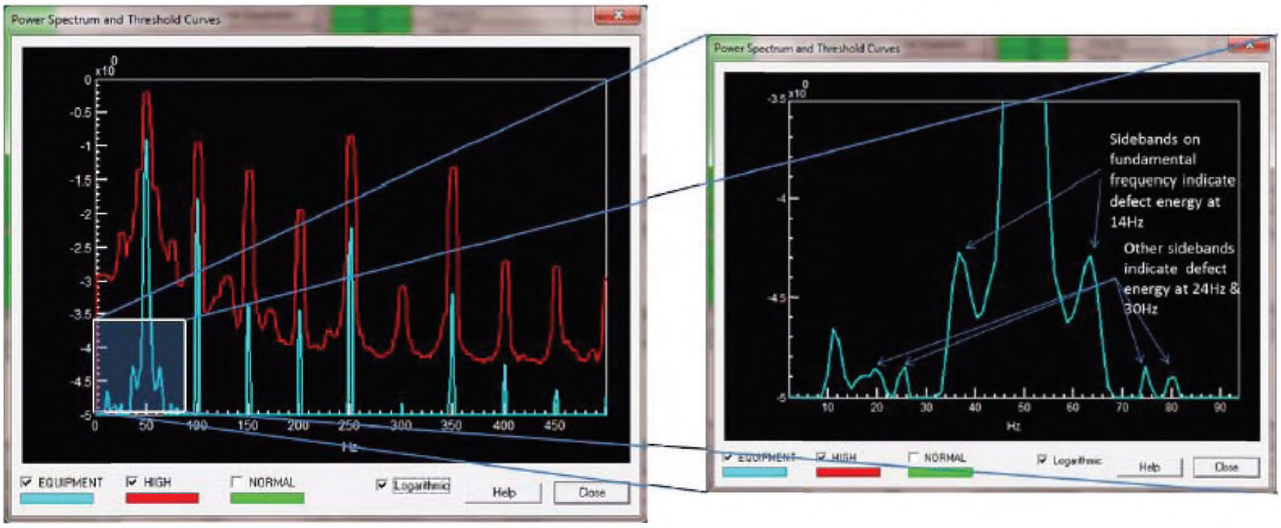


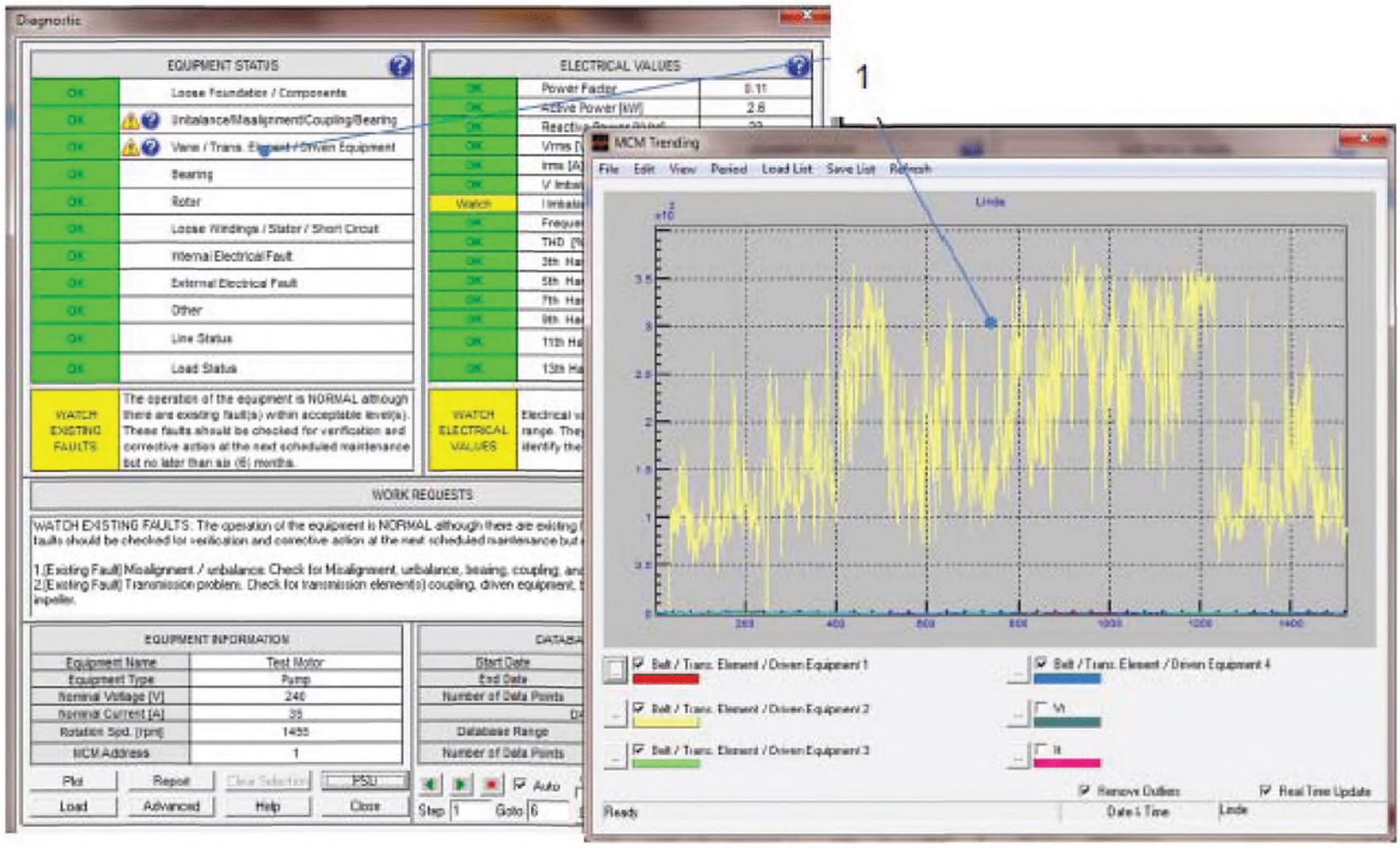
Рисунок D.1 — Типичный вид спектров, получаемых в ходе модельного анализа токов и напряжений

Измерения токов и напряжений позволяют рассчитать передаваемую мощность и нагрузку системы. Чтобы избежать появления ложных сигналов предупреждения, сравнение электрических параметров следует проводить при заданном значении мощности, так же как сопоставление вибрационных параметров проводят при заданной нагрузке (для которой был построен базовый уровень).

Начальный анализ выходных параметров системы проводится в автоматическом режиме и позволяет получить первый приближенный диагноз в форме, подобной той, что показана на рисунке D.2.

Неисправности, которые могут быть обнаружены системой, не ограничиваются электродвигателем, но включают в себя также неисправности приводного оборудования. Это может оказаться особенно полезным, когда доступ к точкам измерений вибрации приводного оборудования затруднен, поскольку измерения токов и напряжений обычно проводят в контрольно-пусковом шкафу, расположенном в легко доступном месте.

Дополнительным преимуществом анализа токов и напряжений по сравнению с анализом вибрации является возможность измерений гармонических искажений в системе питания. Иногда это позволяет избежать неверных диагнозов, которые могут иметь место, если анализу подвергаются только сигналы вибрации. Например, присутствие в сетевом напряжении 5-й и 7-й гармоник частоты питания могут вызвать тряску ротора, которую обнаруживают датчики вибрации и которая может быть ошибочно отнесена к признаку дефекта подшипника. Модель, построенная на отношениях токов и напряжений, позволяет избежать ошибок, связанных с искажениями в питающей сети, поскольку эти искажения не влияют на величину отношений и не могут повлечь ложного диагноза в отношении неисправностей механической природы. В то же время указанные искажения легко идентифицировать, что позволяет принять меры по улучшению качества электрического питания двигателя.



1 — автоматическое построение диагнозов и соответствующих трендов

Рисунок D.2 — Типичное представление данных системой модельного анализа токов и напряжений

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным и межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального и межгосударственного стандарта
ISO 1925	—	*
ISO 2041	IDT	ГОСТ Р ИСО 2041—2012 «Вибрация, удар и контроль технического состояния. Термины и определения»
ISO 7919-1	IDT	ГОСТ ИСО 7919-1—2002 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования»
ISO 10816-1	IDT	ГОСТ ИСО 10816-1—97 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования»
ISO 13372	IDT	ГОСТ Р ИСО 13372—2013 «Контроль состояния и диагностика машин. Термины и определения»
ISO 13373-1	IDT	ГОСТ Р ИСО 13373-1—2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы»
ISO 13373-2	IDT	ГОСТ Р ИСО 13373-2—2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации»
ISO 13373-3	IDT	ГОСТ Р ИСО 13373-3—2016 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 3. Руководство по диагностированию по параметрам вибрации»
ISO 20958	IDT	ГОСТ ISO 20958—2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя»

* Соответствующий национальный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.

Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандартов:
- IDT — идентичные стандарты.

Библиография

[1] ISO 17359 Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines

[2] ISO/TR 19201 Mechanical vibration — Methodology for selecting appropriate machinery vibration standards

[3] Finley, W. R., Hodowanec, M. M., Holter, W. G. An analytical approach to solving motor vibration problems. IEEE Transactions on Industry Applications, September/October 2000, pp. 1467—1480

[4] Mistry, R., Finley, W. R., Kreitzer, S. Induction motor vibrations in view of API 541 4th edition. Proceedings of Petroleum and Chemical Industry Conference, September 2008, Cincinnati, Ohio, USA, pp. 163—172

[5] Tilley, S. Case history — Rotor bar problem in an electric motor. Vibration Magazine, Vol. 26, No. 4, 2009, pp. 10—11

[6] Branca, B., Eshleman, R. L., Evans, B. Induction motor vibration case histories. Proceedings of the 31st Annual Meeting of the Vibration Institute, San Antonio, Texas, USA, 2007, pp. 277—324

[7] Gonçalves, V. S., Herzog, L., Da Silva Ribeiro, S. C. Using ODS vibration techniques to solve problems in motor bearings to maximize compressor service time. EEMODS 13 Conference, October 2013,

gost.e-ecolog.ru

УДК 534.322.3.08:006.354 ОКС 17.160 Т34

Ключевые слова: электродвигатели, контроль технического состояния, диагностирование, вибрация, схема структурного диагностирования, таблицы процессов, таблицы неисправностей

Редактор *И.П. Шайняк*
Технический редактор *В.Ю. Фотиева*
Корректор *Р.А. Ментова*
Компьютерная верстка *И.А. Налейкиной*

Сдано в набор 05.12.2016. Подписано в печать 10.01.2017. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,93. Тираж 28 экз. Зак. 37.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru