ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р ИСО 16079-2— 2021

Контроль состояния и диагностика машин

ВЕТРОГЕНЕРАТОРЫ

Часть 2

Контроль состояния трансмиссии

(ISO 16079-2:2020, Condition monitoring and diagnostics of wind turbines — Part 2: Monitoring the drivetrain, IDT)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2022

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Закрытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (ЗАО «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 29 ноября 2021 г. № 1640-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 16079-2:2020 «Контроль состояния и диагностика ветрогенераторов. Часть 2. Контроль состояния трансмиссии» (ISO 16079-2:2020 «Condition monitoring and diagnostics of wind turbines — Part 2: Monitoring the drivetrain», IDT).

Международный стандарт разработан Техническим комитетом ISO/TC 108 «Вибрация, удар и контроль состояния», подкомитетом SC 5 «Контроль состояния и диагностика машинных систем».

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

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 установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© ISO, 2020
© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2022

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 1
4 Обозначения и сокращения 2
5 Анализ признаков видов отказов (FMSA) 2
5.1 Общие положения 2
5.2 Содержание процедуры FMSA 3
6 Контролируемые параметры для выявления неисправности 3
6.1 Общие положения 3
6.2 Типы контролируемых параметров 4
6.3 Контролируемые параметры рабочего процесса 5
6.4 Измерения частоты вращения и связанных с ней величин 6
6.5 Контролируемые параметры вибрации 7
6.6 Анализ упругих волн в материале 9
6.7 Контролируемые параметры для содержания частиц в масле 10
7 Межконтрольный интервал 12
7.1 Базовые стандарты 12
7.2 Факторы, влияющие на межконтрольный интервал 12
8 Критерии формирования оповещений системы контроля 13
8.1 Базовые стандарты 13
8.2 Общие положения 13
8.3 Установление уровней уведомления и предупреждения для нового ветрогенератора 14
8.4 Установление уровней уведомления и предупреждения для нормального режима работы ветрогенератора 14
8.5 Установление уровней уведомления и предупреждения после замены узла или детали 14
9 Адаптация к условиям работы ветрогенератора 15
9.1 Общие положения 15
9.2 Пример реализации принципа адаптации 15
10 Места установки преобразователей 16
10.1 Базовые стандарты 16
10.2 Расположение преобразователей вибрации 16
10.3 Расположение датчиков упругих волн 18
10.4 Расположение датчиков частиц износа 18
10.5 Соглашение об обозначении мест установки преобразователей 18
11 Построение базовой линии 19
11.1 Общие положения 19
11.2 Длительность временного сигнала базовой линии 19
11.3 Повторяемость и стабильность временного сигнала 20
11.4 Частота дискретизации временного сигнала 20
11.5 Проверка сформированной базовой линии 20
12 Диагностирование 20
12.1 Базовые стандарты 20
12.2 Общие положения 21
12.3 Данные о ветрогенераторе 21

12.4 Запись временных сигналов в целях диагностирования 21
12.5 Регулярная запись временных сигналов 21
12.6 Запись временных сигналов по требованию 21
13 Прогнозирование 22
13.1 Базовые стандарты 22
13.2 Общие положения 22
13.3 Модель типа I 22
13.4 Модель типа II 23
13.5 Модель типа III 24
14 Эффективность системы контроля состояния 24
14.1 Базовые стандарты 24
14.2 Общие положения 24
14.3 Оценка эффективности работы системы контроля 24
14.4 Оценка эффективности затрат 25
Приложение А (справочное) Контролируемые параметры вибрации 28
Приложение В (справочное) FMSA для трансмиссии ветрогенератора 35
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным и межгосударственным стандартам 37
Библиография 38

Введение

Настоящий документ является следующим этапом в организации системы контроля состояния и диагностирования ветрогенераторов согласно V-образной диаграмме, введенной в ИСО 13379-1. На данном этапе определена стратегия контроля трансмиссии ветрогенератора на основе приоритетов, установленных для разных видов отказов в соответствии с процедурой анализа видов, последствий и критичности отказов (FMECA) согласно ИСО 16079-1 (см. рисунок 1).

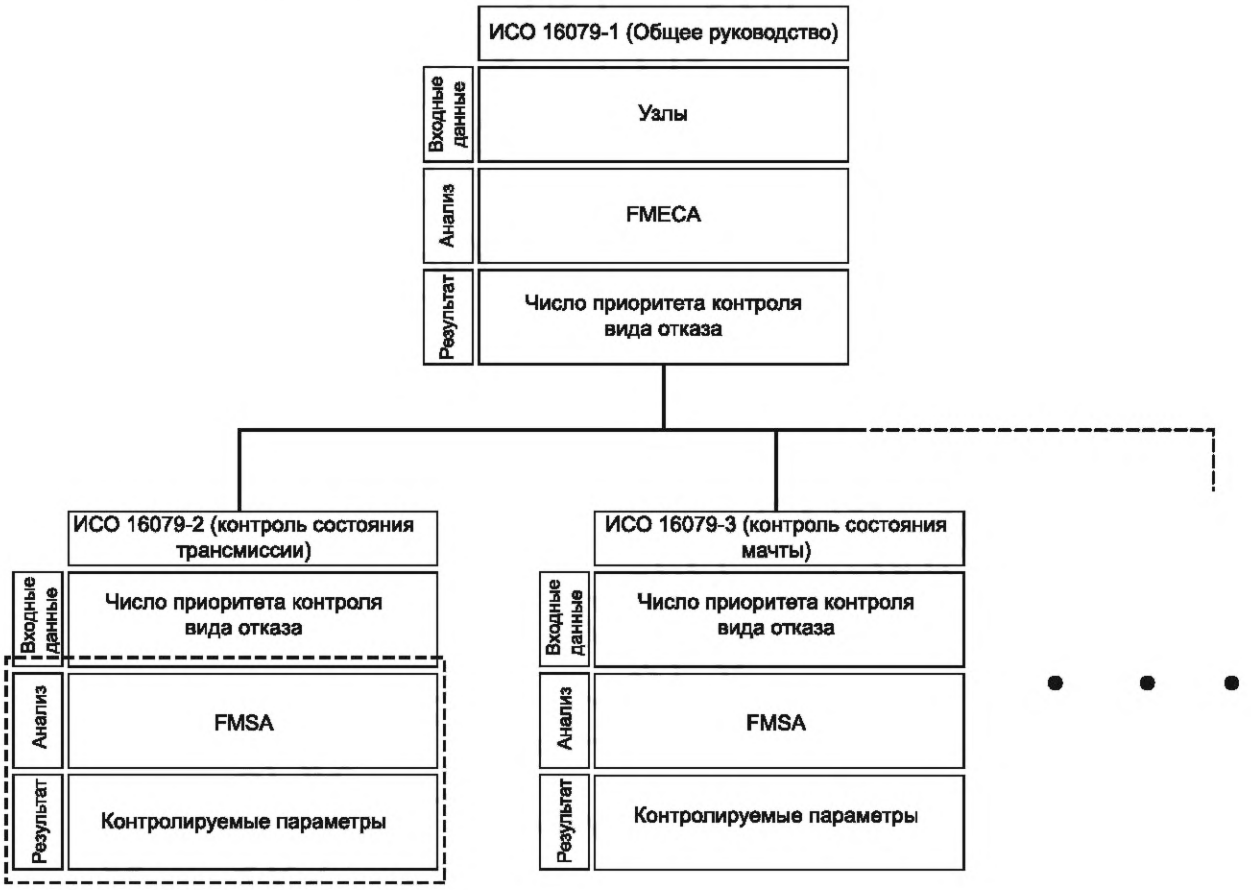


Рисунок 1 — Связь настоящего стандарта с ИСО 16079-1

В соответствии с V-образной диаграммой ИСО 13379-1 и ИСО 16079-1 в настоящем стандарте рассматриваются следующие вопросы:

a) определение режимов работы ветрогенератора, на которых может быть обеспечено наилучшее диагностирование для неисправностей разного вида, и выбор режима для контроля;

b) выбор признаков неисправностей для анализа технического состояния ветрогенератора и последующего диагностирования;

c) составление перечня контролируемых параметров, на основе которых должны быть получены признаки неисправностей;

d) выбор методов измерения и преобразователей, которые должны быть использованы для получения значений контролируемых параметров (непосредственно в результате измерений или после обработки данных измерений на компьютере).

В настоящем документе рассматриваются две последние ступени стадии исследования на V-образной диаграмме организации системы контроля (см. рисунок 2), которые должны обеспечивать доступность необходимых данных, обеспечивающих высокую эффективность процедур на стадии применения системы. Конечной целью системы диагностирования на стадии применения является минимизация потерь вследствие простоев ветроэнергетической установки путем оценки риска, связанного с выявленной неисправностью, на основе расчета остаточного ресурса с последующим планированием

мер по техническому обслуживанию. Для оценки критичности отказа и соответствующих рисков используют результаты применения процедур FMECA, но эти оценки также обеспечивают обратную связь для корректировки указанных процедур.

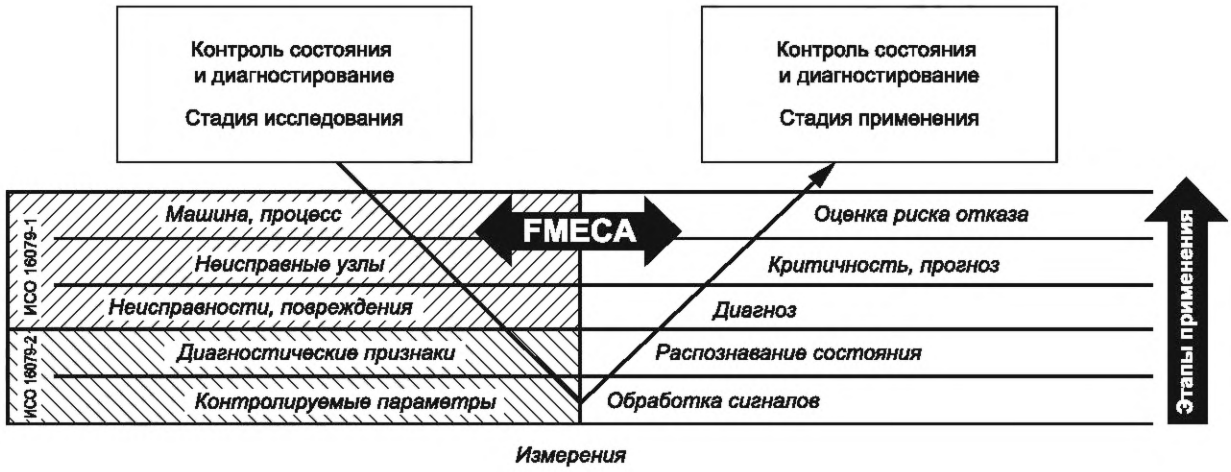


Рисунок 2 — Структура процессов контроля состояния и диагностирования: стадии исследования и применения

В настоящем стандарте показано, как результаты FMECA, полученные в соответствии с ИСО 16079-1, могут быть применены в целях анализа признаков видов отказов (FMSA) для определения признаков неисправностей и соответствующих контролируемых параметров, позволяющих обнаруживать отказы разных видов. Применение результатов анализа представлено в виде рекомендаций по контролю состояния ветрогенераторов, включающих:

1) измерения контролируемых параметров;
2) адаптацию к изменению режима работы ветрогенератора;
3) выбор преобразователей;
4) выбор мест установки преобразователей;
5) кодировку мест установки преобразователей и связанных с ними контролируемых параметров;
6) критерии оценки контролируемых параметров;
7) требования к данным для проведения диагностирования;
8) прогноз и оценку критичности состояния;
9) анализ функционирования системы контроля, включая:
   a) оценку результатов системы диагностирования,
   b) анализ экономической эффективности

На рисунке 3 показано, как соотносятся между собой стратегии контроля, диагностирования и технического обслуживания и как они реализуются в системе контроля состояния. Если данные, необходимые для реализаций стратегий контроля и диагностирования отсутствуют или недостоверны, то следствием этого будет построение ненадежных диагнозов и компрометация системы контроля в целом.

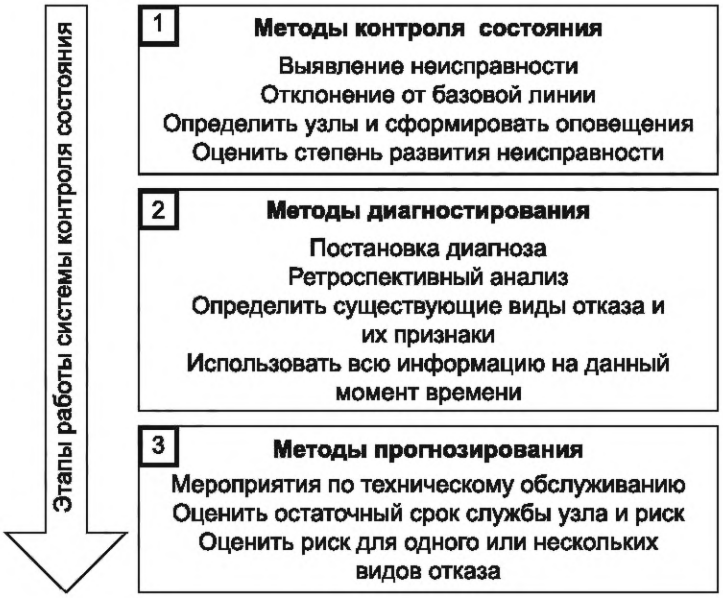


Рисунок 3 — Соотношение методов контроля, диагностирования и прогнозирования

Выбор метода контроля позволяет ответить на вопросы, где проводить измерения, что и с какой частотой измерять, чтобы получить данные, необходимые для:

- обнаружения видов отказов, подлежащих выявлению системой контроля;
- оценки степени развития неисправности;
- оценки остаточного ресурса узла.

Слабые места в организации контроля (например, отсутствие необходимых преобразователей или неправильный выбор их местоположения, ограничение контролируемых параметров или недостаточное количество данных) влияют на достижение конечной цели системы контроля — построение достоверного прогноза.

Метод диагностирования выбирают с учетом возможности получения данных, необходимых для:

- детального анализа вида отказа с определением его причин;
- оценки степени развития неисправности;
- оценки остаточного ресурса узла.

Метод прогнозирования должен обеспечить предсказание остаточного ресурса узла и оценить риск вторичных отказов.

Мероприятия по техническому обслуживанию основаны на данных контроля, диагностирования и прогнозирования, а также на предшествующей истории технического обслуживания и предупреждений, поступающих от системы контроля. В связи с этим записи и хранению подлежат не только данные измерений, но также информация о предшествующих предупреждениях систем и мероприятиях по техническому обслуживанию с указанием сотрудников, принимавших соответствующие решения и участвовавших в этих мероприятиях.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Контроль состояния и диагностика машин

ВЕТРОГЕНЕРАТОРЫ

Часть 2

Контроль состояния трансмиссии

Condition monitoring and diagnostics of machines. Wind turbines. Part 2. Monitoring the drivetrain

Дата введения — 2022—06—01

1 Область применения

Настоящий стандарт содержит руководство по применению систем контроля состояния ветрогенераторов, в первую очередь, их трансмиссии. Руководство включает в себя применение процедур FMSA, а также некоторые основанные на практическом опыте рекомендации в отношении систем, используемых для выявления отказов разных видов, диагностирования и прогнозирования состояния узлов трансмиссии ветрогенераторов, с коробкой передач и прямого привода, включая:

a) опорный подшипник;

b) коробку передач (при наличии);

c) электрогенератор (только механическую часть).

Помимо основных узлов трансмиссии рассматриваются также ее другие части, такие как соединительная муфта и система смазки.

В настоящем стандарте дан общий обзор важных аспектов контроля состояния и диагностирования ветрогенераторов и приведены ссылки на общие стандарты в области контроля состояния и диагностики, где эти аспекты рассматриваются более подробно.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты [для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного стандарта, для недатированных — последнее издание (включая все изменения)]:

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

ISO 13372:2012, Condition monitoring and diagnostics of machines — Vocabulary (Контроль состояния и диагностика машин. Словарь)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ИСО 2041 и ИСО 13372, а также следующий термин с соответствующим определением.

ИСО и МЭК ведут терминологические базы данных для использования в стандартизации по следующим адресам:

- Платформа онлайн-просмотра ИСО: доступна на gost.e-ecolog.ru ;
- Электропедия МЭК: доступна на gost.e-ecolog.ru .

Издание официальное

3.1 **временной сигнал** (time waveform): Запись выборки сигнала от преобразователя вибрации.

Примечание 1 — Временной сигнал имеет определенную длину и представляет собой выборку мгновенных значений сигнала вибрации в заданные моменты времени на интервале записи.

4 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте использованы обозначения и сокращения в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 — Обозначения и сокращения

Обозначение/ сокращение	Расшифровка/пояснение
ETTF	Оценка времени до отказа.
FMECA	Анализ видов, последствий и критичности отказов.
FMSA	Анализ признаков видов отказов.
IEPE	Класс пьезоэлектрических акселерометров со встроенным электронным усилителем и токовым выходом.
IIoT	Промышленный интернет вещей. Может рассматриваться как технология, связанная с интернетом вещей (IoT). Для обеих технологий характерен доступ к интеллектуальным устройствам, а главное отличие между ними определяется их назначением. Если IoT нацелен на создание удобств для человека, то IIoT применяется в производственных целях для обеспечения технологических процессов, контроля цепи поставок, в системах управления производством.
n_{MP}	Число приоритета контроля.
OPC	Коммуникация по открытым протоколам. Целью OPC является определение интерфейса, который, будучи созданным для одного устройства, мог бы потом использоваться в любых системах сбора, обработки и отображения данных об объекте управления, операторских панелях и т.п. Консорциум OPC Foundation поддерживает стандарты OPC, одобренные МЭК как стандарты серии МЭК 62541.
RUL	Остаточный ресурс
TCP/IP	Межсетевой протокол управления передачей данных. Используется для передачи данных между устройствами через Интернет.
БПФ	Быстрое преобразование Фурье.
МЭМС	Микроэлектромеханическая система. Используется в преобразователях, изготовленных с применением технологий микроэлектроники, которые позволяют создавать механические чувствительные элементы миниатюрных размеров, обычно на основе монокристаллов кремния. МЭМС-преобразователи могут использоваться для измерений физических параметров, таких как ускорение.

5 Анализ признаков видов отказов (FMSA)

5.1 Общие положения

FMSA расширяет процедуру FMECA, уделяя основное внимание признакам неисправностей, связанных с возможными видами отказов, которые идентифицированы и ранжированы в соответствии с FMECA.

Методология FMSA была разработана, чтобы помочь выбрать такие методы и стратегии контроля, которые были бы максимально чувствительны к обнаружению признаков неисправностей и к скорости их изменений, обеспечивая тем самым наибольший уровень доверия к диагнозам и прогнозам состояния в отношении каждого вида отказов для каждого узла машины.

Если уровень доверия к чувствительности метода, а тем самым и к точности диагноза (прогноза) недостаточен, то рекомендуется использовать дополнительные способы контроля.

Руководство по применению процедур FMECA в отношении ветрогенераторов приведено в [10].

5.2 Содержание процедуры FMSA

В процедуре FMSA должна участвовать команда экспертов, обладающих достаточным опытом участия в программах контроля состояния машин и глубокими знаниями в отношении устройства и функционирования той машины, для которой эту процедуру выполняют.

Основными элементами процедуры являются:

- составление перечня узлов (частей) машины, подлежащих контролю;
- составление перечня возможных видов отказов для каждого узла;
- определение влияния каждого вида отказа на работу машины и технологический процесс в целом;
- определение основных причин отказа каждого вида;
- определение признаков неисправностей, сопровождающих отказ каждого вида;
- определение основных и вспомогательных методов контроля;
- определение периодичности контроля (межконтрольного интервала);
- определение возможных дополнительных методов контроля, которые могут быть использованы во время процедур контроля (применение таких методов позволяет повысить достоверность диагноза и прогноза).

Процедуру FMSA выполняют для каждого узла и вида отказа в соответствии с их ранжированием по числу приоритета контроля n_{MP}, полученного на стадии FMECA.

Для последовательного выполнения процедуры FMSA удобно использовать шаблон (см. таблицу 2).

Пример выполнения процедуры FMSA для наиболее частых видов отказов трансмиссии ветрогенератора приведен в приложении В.

Таблица 2 — Шаблон для применения процедуры FMSA

Узел <указать код по RDS-PP[1)]>	**<дать описательное имя, полученное от FMECA>**	**<указать краткое имя по МЭК 61400-25-6>**
Вид отказа	<назвать вид отказа согласно анализу FMECA>	
Причина отказа	<указать, чем вызван отказ данного вида>	
Влияние отказа	<указать, на что влияет отказ, его последствия>	
Число приоритета n_{MP}	<указать число приоритета контроля, полученное от FMECA>	
P-F-интервал	<дать ориентировочную оценку>	
Признаки неисправности	<описать признаки, указывающие на наличие отказа данного вида>	
Контролируемые параметры	<назвать параметр>	<дать его описание>
	<назвать параметр>	<дать его описание>
	...	...
Основной метод контроля	<дать описание метода>	
Межконтрольный интервал	<указать интервал между последовательными измерениями контролируемых параметров>	
Коррелированный параметр рабочего процесса машины	<назвать параметр>; если таких параметров несколько, добавить строки в таблицу	

[1)] Согласно ISO/TS 81346-10 «Промышленные системы, установки, оборудование и промышленная продукция. Принципы структурирования и коды. Часть 10. Энергоустановки».

6 Контролируемые параметры для выявления неисправности

6.1 Общие положения

В результате выполнения FMSA должен быть получен перечень потенциальных индикаторов неисправности — контролируемых параметров. В настоящем разделе рассматриваются способы определения некоторых из таких параметров.

Контролируемый параметр представляет собой скалярную измеряемую величину (например, параметр вибрации) или наблюдаемое событие с соответствующей временной отметкой. Такой формат представления очень удобен для отслеживания долговременных трендов величины, фиксации ее изменений со временем и установления корреляций этих изменений с изменениями параметра рабочего процесса машины. Этот же формат облегчает хранение контролируемых параметров в базе данных.

Независимо от применяемого метода контроля возможности системы контроля зависят от следующих основных элементов: числа и типа преобразователей и соответствующих способов обработки данных с этих преобразователей, позволяющих извлечь необходимую информацию в формате контролируемых параметров.

Признак неисправности выражается в виде зависимости от поведения одного или нескольких контролируемых параметров, которое может проявляться в виде:

- наличия;
- отсутствия;
- изменения (в сторону повышения или уменьшения значения);
- места изменения;
- изменения с определенной скоростью;
- корреляции с условиями рабочего процесса.

Чем более селективен контролируемый параметр, тем более чувствителен признак неисправности и, соответственно, тем проще поставить диагноз. Хорошая селективность уменьшает число гипотез на этапе формулировки вывода о неисправности по наблюдаемым признакам неисправности.

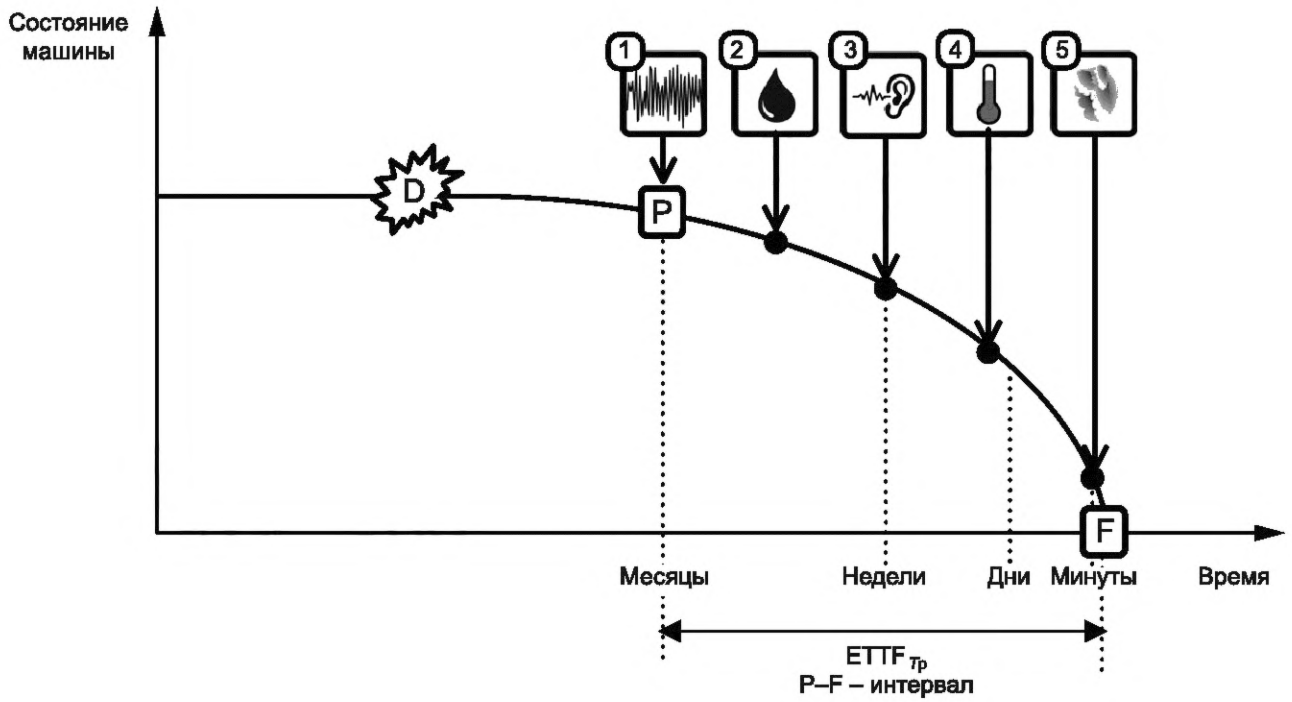
К выбору числа контролируемых параметров следует подходить с большой тщательностью. Информация от каждого параметра должна обладать высокой ценностью, но не быть избыточной. Увеличение количества контролируемых параметров может повысить стоимость процедуры контроля состояния за счет потенциально большего числа ложных сигналов предупреждения из-за статистических выбросов.

6.2 Типы контролируемых параметров

Контролируемые параметры выбирают с учетом характеристик разных неисправностей, рассматриваемых в ходе FMSA. Наиболее употребительные параметры, применяемые для контроля состояния трансмиссии ветрогенератора, могут быть сгруппированы следующим образом:

- параметры рабочего процесса;
- частота вращения турбины ветрогенератора;
- параметры вибрации;
- параметры загрязнения масла, получаемые системой онлайн-контроля.

Из перечисленных самыми употребительными являются параметры вибрации. Параметры рабочего процесса (такие, как скорость вращения, скорость ветра, активная мощность) часто используют для корректировки параметров вибрации с учетом изменяющихся рабочих условий. Онлайн-контроль состава масла применяют для обнаружения в нем металлических и неметаллических частиц. Пример развития неисправности вплоть до отказа и связь этого процесса с контролируемыми параметрами показан на рисунке 4.



D — начало развития неисправности; P — точка потенциального отказа; F — точка отказа; 1 — точка, в которой можно зафиксировать рост вибрации по самым чувствительным контролируемым показателям; 2 — точка, в которой анализ масла показывает наличие частиц износа; 3 — точка регистрации слышимого акустического шума; 4 — точка регистрации повышенной температуры; 5 — точка обнаружения дыма (по запаху или визуально)

Примечание — Рисунок иллюстрирует характерный пример развития неисправности подшипника. В случае, например, дефекта зубчатого зацепления точка потенциального отказа может быть определена по наличию частиц износа в масле. Последовательность точек регистрации событий зависит в первую очередь от возможностей системы контроля вибрации.

Рисунок 4 — Пример развития механической неисправности

6.3 Контролируемые параметры рабочего процесса

6.3.1 Общие положения

Параметры рабочего процесса получают либо от контроллера ветрогенератора, либо непосредственными измерениями с использованием соответствующих преобразователей. В число измеряемых величин входят: температура, давление, нагрузка, электрическое напряжение, скорость ветра, направление ветра, азимутальный угол, активная мощность и температура подшипников.

Получаемые значения параметров не требуют дополнительной обработки. О состоянии ветрогенератора можно судить по изменениям этих параметров со временем или друг относительно друга. В отношении данных параметров частые измерения (в масштабе миллисекунд) не дают дополнительной полезной информации по сравнению с результатах измерений на больших интервалах времени.

Контролируемые параметры процесса могут быть использованы в следующих целях:

- отслеживание тренда во времени (например, контроль изменения температуры подшипника);
- определения корреляции с другими параметрами (например, построение графиков зависимостей между разными параметрами);
- классификации рабочих состояний (например, с целью возможных внесений поправок в уровни предупреждения по параметрам вибрации в зависимости от условий работы ветрогенератора).

Важными и часто используемыми в целях контроля являются такие параметры рабочего процесса, как:

- **активная мощность ветрогенератора.** Важность этого параметра обусловлена его связью с нагрузками на элементы ветрогенератора. Обычно чем выше производимая мощность, тем больше механические напряжения в узлах ветрогенератора. Активная мощность сильно коррелирована также с уровнями вибрации на разных частях трансмиссии. Этот параметр часто используют в целях классификации рабочего состояния ветрогенератора;

- **скорость ветра.** Этот параметр также связан с нагрузками, испытываемыми ветрогенератором;
- **температура.** Измерение температуры узлов и частей ветрогенератора, таких как подшипники, масло в системе смазки, обмотка электрогенератора, — один из наиболее часто встречающихся способов контроля. Наблюдение за изменением температуры важно для выявления потенциальных повреждений узла, поскольку позволяет получить информацию о разрушительных процессах внутри узлов из-за повышенного механического трения в подшипниках и зубчатых передачах, неудовлетворительного качества масла и потери или ухудшения качества электрических соединений. Однако для данного параметра характерно медленное изменение во времени, поэтому его нельзя использовать для раннего и точного обнаружения неисправности. Кроме того, на температуру оказывает влияние окружающая среда. Температуру рассматривают как важный вторичный источник информации при использовании ее измерений совместно с измерениями вибрации.

6.3.2 Интерфейсы передачи данных

Передачу контролируемых параметров рабочих процессов обычно осуществляют с помощью:

- токовой петли 4-20 мА. Такой вид интерфейса нашел широкое применение во многих системах мониторинга промышленных процессов. Данные с датчиков передаются по замкнутой электрической цепи, что особенно выгодно при необходимости передачи на дальние расстояния, поскольку при этом на качество передачи не влияет падение напряжения в линии. Такой тип интерфейса использован во многих контроллерах ветроэнергетических установок прошлых лет выпуска;
- передачи напряжения с выходных клемм датчика. Некоторые контроллеры используют электрическое напряжение, пропорциональное измеряемому параметру процесса. Однако такой вид интерфейса встречается гораздо реже по сравнению с токовой петлей 4—20 мА, и он неудобен для передачи данных на значительные расстояния;
- локальной сети (LAN). Параметры процесса могут быть получены непосредственно от контроллера или SCADA-системы по протоколам сети. Обычно используют протоколы высокого уровня, такие как Modbus TCP/IP или OPC. Некоторые поставщики предлагают системы с собственными запатентованными протоколами передачи данных.

6.4 Измерения частоты вращения и связанных с ней величин

6.4.1 Общие положения

Изменение частоты вращения турбины вызывает изменения многих других контролируемых параметров, поэтому измерения частоты вращения важны с точки зрения возможности внесения в значения этих параметров соответствующих поправок. Для таких параметров информативным является не абсолютное значение частоты, а ее отношение к частоте вращения турбины. Примером такого параметра является уровень вибрации зубцовой частоты, по которому судят о состоянии зубчатой передачи в коробке передач.

Данные о частоте вращения могут быть получены и сохранены в виде временного сигнала или в виде временных отметок, связанных с положением вала и регистрируемых один или несколько раз за оборот турбины. Эти данные используют в дальнейшем для детального анализа параметров, зависящих от частоты вращения турбины.

6.4.2 Измерения

Качество результата измерений частоты вращения зависит от правильного выбора типа и числа датчиков.

1) Тахометр. Обычно для целей измерений частоты вращения используют бесконтактный индуктивный тахометр. Как правило (в зависимости от передаточного числа коробки передач), для высокоскоростных валов достаточно получать один импульс на оборот вала для привязки к фазе сигнала вибрации. Измерения фазы целесообразны при обнаружении неисправностей, связанных с состоянием вала. Для анализа состояния низкооборотных роторов желательно получать отдельный импульс с низкооборотного вала для анализа вектора вибрации.

2) Отметчики фазы. Данные о приращениях угла оборота вала, получаемые с помощью нескольких отметчиков фазы, обеспечивают более точные измерения частоты вращения. Двух отметчиков фазы достаточно для анализа крутильной вибрации вала.

3) Сигнал с контроллера. Применение сигнала с контроллера ветрогенератора для измерения частоты вращения допустимо в том случае, если он обеспечивает достаточную точность и разрешение по фазе. Недостаточная точность может вызвать ошибки при анализе параметров, зависящих от частоты вращения.

6.5 Контролируемые параметры вибрации

6.5.1 Базовые стандарты

Общую информацию о контролируемых параметрах вибрации можно найти в [2], [5[, [6] и [17].

6.5.2 Общие положения

Информация, содержащаяся в сигнале от преобразователя вибрации, весьма разнообразна. В отличие от обычных параметров рабочего процесса (например, температуры), которые характеризуют процесс в точке измерения, сигнал вибрации несет информацию о состоянии разных узлов машины, как правило, на характерных частотах этих узлов. Эта вибрация связана с перемещением разных частей машины друг относительно друга, которые могут быть как значительными (например, вследствие дисбаланса или несоосности), так и очень малыми (например, вследствие ударов, усталостных процессов или трения).

Так, один параметр, полученный из сигнала вибрации, позволяет выявить повреждение внешнего кольца определенного подшипника, а другой, выделенный из того же сигнала и показывающий высокий уровень вибрации на частоте вращения ротора, может свидетельствовать о несоосности вала и подшипника, дисбалансе ротора или неисправности сопряженного вала. На рисунке 5 показаны области широкого диапазона частот вибрации, соответствующие разным контролируемым параметрам, позволяющим обнаруживать соответствующие виды отказов узлов турбогенератора.



Рисунок 5 — Типичные области спектра, по которым определяют виды отказов ветрогенератора

Контролируемые параметры вибрации получают в результате цифровой обработки сигнала от преобразователя вибрации. Эти параметры можно разделить на три вида:

a) параметры, характеризующие временную форму сигнала;

b) параметры, характеризующие уровень вибрации в узких полосах частот сигнала;

c) параметры, полученные в результате обработки сигнала в широкой полосе частот (спектр, спектр огибающей, кепстр).

Каждый контролируемый параметр имеет свою область применения, в которой он наиболее эффективен. Контролируемые параметры могут быть получены разнообразными способами, но при этом следует соблюдать одно правило: вся информация, содержащаяся в сигнале вибрации, должна быть «свернута» в один параметр таким образом, чтобы об изменении состояния машины можно было судить по изменениям этого параметра.

Примеры контролируемых показателей вибрации разных видов рассмотрены в приложении А.

6.5.3 Измерения вибрации

При измерениях вибрации важно правильно выбрать одну из трех величин, ее характеризующих:

- **ускорение.** Обычно для получения сигнала ускорения используют пьезоэлектрический акселерометр. Сигнал ускорения подчеркивает высокочастотные составляющие вибрации, и проведение измерений ускорения должно быть выбрано во всех случаях, когда диапазон частот измерений включает высокочастотную область. Низкочастотные составляющие также содержатся в сигнале ускорения, но их труднее выделить на фоне шумов;

- **скорость.** Измерения скорости часто выполняют с использованием аналогового или цифрового интегрирования сигнала ускорения. На практике применяют также преобразователи, на выходе которых сигнал пропорционален скорости вибрации, но такие преобразователи менее надежны и имеют ограниченный диапазон частот измерений. Среднеквадратичное значение скорости в широком диапазоне частот часто используют для оценки вибрационного состояния машины. Это обусловлено тем, что величина скорости непосредственно связана с энергией производимой вибрации и тем самым может рассматриваться как мера разрушительного действия вибрации;

- **перемещение.** Природа механических систем такова, что существенные перемещения можно наблюдать только на низких частотах. Вследствие этого измерения перемещения имеют ограниченное применение в общем анализе вибрации. По этой величине часто судят о наличии дисбаланса ротора или несоосности, поскольку те вызывают значительные перемещения на частоте вращения вала. Соответствующие контролируемые параметры получают с использованием датчика перемещения или посредством двойного интегрирования сигнала ускорения. Однако последний способ следует применять с осторожностью, поскольку он требует высокого динамического диапазона акселерометра, чтобы не допустить искажений собственными шумами измерительной системы. При определениях положения точки вала в радиальном или осевом направлении используют только датчики перемещения.

Большинство преобразователей, используемых для измерений вибрации, представляют собой IEPE-акселерометры или МЭМС-акселерометры.

6.5.4 Преобразователи вибрации

6.5.4.1 IEPE-акселерометры

В целях контроля состояния и диагностирования ветрогенераторов рекомендуется применять преобразователи данного типа со встроенной электроникой и преобразователем электрического заряда в напряжение. Акселерометр требует внешнего питания постоянным током напряжением от 18 до 24 В, что обычно не представляет проблем при стационарной установке преобразователя. Коэффициент преобразования измеряют в мВ/(м/с^2).

При необходимости выполнять измерения скорости выходной сигнал акселерометра интегрируют. В этом случае единицей измерения коэффициента преобразования будет мВ/(мм/с).

IEPE-акселерометр обладает рядом достоинств, делающих его удобным для применения в системах контроля ветрогенераторов. Среди них:

- широкий диапазон частот и амплитуд;
- надежность в работе, которая особенно важна в жестких условиях эксплуатации ветрогенератора;
- способность работать в диапазоне температур от минус 40 °С до 100 °С, что важно с учетом разнообразий мест установки ветрогенератора — от экватора с его жарким климатом до горных местностей, где температура может опускаться до очень низких значений;
- способность быстро восстанавливаться после ударов, например, вызванных порывами ветра;
- низкая стоимость.

При выборе акселерометра следует обращать внимание на следующее:

a) коэффициент преобразования должен быть близок к постоянному в диапазоне частот от 0,7 Гц до 10 кГц;

b) частота резонанса установленного акселерометра должна находиться в диапазоне от 25 до 30 кГц. Диапазон частот измерительной системы обычно должен охватывать область от наименьшей частоты вращения до высшей частоты возбуждения вибрации, принимаемой во внимание при анализе, умноженной на 3,5. Обычно такой высшей частотой диапазона анализа является частота зацепления зубьев шестерен в коробке передач или частота резонанса, вызванного дефектом элемента качения в подшипнике. Желательно, чтобы верхняя граница диапазона частот измерительной системы была существенно выше частоты резонанса установленного преобразователя, поскольку в этом случае появляется возможность обнаружения дефектов подшипника качения на самой ранней стадии их развития. Чтобы сохранить стоимость преобразователя относительно низкой, требование постоянства коэффициента преобразования не распространяется на очень низкие частоты, до 0,1 Гц. Небольшой спад коэффициента преобразования в этой области не мешает получению надежных результатов относительных измерений;

c) значение коэффициента преобразования должно соответствовать измеряемой вибрации различных участков трансмиссии. Обычно для высокоскоростных участков применяют акселерометры с коэффициентом преобразования 10,2 мВ/(м/с^2), а для низкоскоростных — 50,9 мВ/(м/с^2). Перед применением акселерометра значение коэффициента преобразования подлежит проверке;

d) допуск на значение коэффициента преобразования в диапазоне частот измерений не должен превышать ± 5 %.

6.5.4.2 МЭМС-акселерометры

Акселерометры данного вида даже дешевле, чем IEPE-акселерометр, но обладают столь же хорошими физическими свойствами. С помощью данного акселерометра можно проводить измерения в диапазоне частот с нижней границей вплоть до 0 Гц. МЭМС-акселерометры требуют питания постоянным током с напряжением от 6 до 30 В.

По сравнению с IEPE-акселерометрами преобразователи данного вида:

- способны выполнять измерения в диапазоне частот, начиная с 0 Гц, что делает их пригодными для измерений постоянных перемещений, например угла наклона;

- диапазон частот, в котором могут наблюдаться резонансы МЭМС-акселерометров, весьма широк. Для самых дешевых моделей из значения ниже и составляют приблизительно несколько килогерц. У более дорогих моделей области резонансов сопоставимы с резонансами IEPE-акселерометров;

- для МЭМС-акселерометров характерен более высокий уровень собственных шумов, поэтому они уступают IEPE-акселерометрам в ситуациях, когда необходимо проводить измерения вибрации низкого уровня.

С развитием технологий разрыв в характеристиках IEPE-акселерометров и МЭМС-акселерометров может сократиться еще более.

6.5.5 Крепление преобразователя вибрации

При выборе места установки и способа крепления преобразователя вибрации следует учитывать широкий диапазон частот измерений, частые ударные нагрузки и возможность высоких температур в точке установки. Крепление, особенно при необходимости измерений высокочастотных составляющих, должно быть жестким и способным выдерживать удары.

Предпочтительным методом установки является жесткое механическое крепление, для которого высверливают отверстия на поверхности вибрирующего узла и на монтажной поверхности преобразователя, нарезают в отверстиях резьбу и соединяют поверхность с преобразователем посредством шпильки. Крепление на шпильку обеспечивает хорошую передачу высокочастотной вибрации с минимальными потерями. Поверхность, на которую устанавливают преобразователь, должна быть плоской, гладкой и чистой. Нанесение на нее тонкого слоя силиконовой смазки или другого аналогичного вещества еще более повышает точность передачи высокочастотной вибрации на вход преобразователя. Для новых машин выбор точки установки и подготовку поверхности к креплению преобразователя вибрации осуществляет изготовитель.

Если крепление на шпильку невозможно или неудобно из практических соображений, то преобразователь устанавливают на цемент. Используют цемент той марки, которая обеспечивает его высокую жесткость при отвердевании. Применение мягких адгезивных материалов не допускается, поскольку они ухудшают точность передачи вибрации.

Вне зависимости от того, какой способ крепления использован, важно, чтобы место установки было доступно и обеспечивало быструю замену преобразователя в случае необходимости. Дополнительные сведение о преобразователях и способах их крепления приведены в разделе 10 (см. также [19]).

6.6 Анализ упругих волн в материале

6.6.1 Общие положения

Ударные или усталостные процессы в материале, а также трение между поверхностями вызывают появление упругих волн, которые распространяются по конструкции машины со скоростью звука в металле и вызывают высокочастотные колебания на поверхности узлов трансмиссии.

Известны несколько методов измерений высокочастотных ударных процессов, вызванных столкновением движущихся частей или дефектами поверхности, включающих в себя измерения ультразвука, ударных импульсов, сигналов акустической эмиссии или механических напряжений. Все они обеспечивают измерение одних и тех же высокочастотных сигналов, но с помощью разных технологий.

Измерение характеристик упругих волн особенно полезно в целях раннего обнаружения дефектов подшипников, особенно тихоходных, у которых признаки неисправности часто проявляют себя на тех же частотах, что и для других узлов, и поэтому плохо различимы.

Применение: для раннего обнаружения дефектов подшипников. Широко применяемым методом является измерение на частоте резонанса преобразователя, позволяющего усилить поступающий сигнал, с последующим анализом огибающей или измерением энергии импульсов в боковых полосах частот.

Преимущества: очень высокая чувствительность к зарождающимся дефектам, таким как микротрещины в приповерхностном слое материала, трещины на поверхности или появление трущихся поверхностей из-за отсутствия смазки. Упругие волны появляются только вследствие микроударов и не связаны с движениями частей машины, синхронными с частотой вращения ротора (за исключением некоторых видов перегрузок);

Недостатки: сильная зависимость от пути распространения волн. Вследствие этого данный вид измерений сложно использовать для количественной оценки неисправности, а также установить предельные уровни сигнала. Кроме того, появившийся сигнал трудно привязать к конкретной неисправности и месту ее зарождения. Упругие волны чувствительны к шумам, связанным с нежесткостью конструкции. Обычно пути распространения волны к преобразователю не проходят через локальные изгибы конструкции, но если это не так, то сигнал становится очень зашумленным. Кроме того, сигнал с преобразователя содержит информацию о разных микроударах, не обязательно от микроударов в подшипнике.

6.6.2 Измерения упругих волн

Степень затухания упругих волн на пути их распространения от источника зависит от частоты — чем выше частота, тем больше затухание. Особенно сильно зависимость от частоты проявляется в том случае, если пакет волн пересекает физическую границу двух сред, например при распространении от вала или внутреннего кольца подшипника до точки измерения на корпусе машины. Упругие волны в материале, свидетельствующие о дефектах подшипников, измеряют обычно в диапазоне частот от 15 до 60 кГц (в отдельных случаях от 10 кГц до 2 Мгц).

Для получения контролируемых параметров используют следующие методы обработки:

a) демодуляция сигнала (анализ огибающей). С помощью полосового фильтра, включающего частоту резонанса преобразователя, и последующего детектирования выделяют низкочастотную огибающую сигнала;

b) выделение пиков временного сигнала. Этот метод также использует измерения вокруг частоты резонанса датчика, однако в отличие от анализа огибающей здесь не осуществляется низкочастотная фильтрация сигнала. Вместо этого анализу подвергаются пики во временной реализации сигнала;

c) непосредственный анализ высокочастотного сигнала. Если возможности системы контроля допускают анализ на частотах свыше 50 кГц, то используют методы анализа, аналогичные тем, что применяют при обычном анализе в низкочастотной области.

6.6.3 Преобразователи

Акселерометры. Их достоинством является возможность измерения сигнала в широком диапазоне частот, что позволяет уловить энергию упругих волн, обусловленных микроударами, микротрещинами или трением. Недостатком является то, что в сигнал акселерометра входят и все другие составляющие, связанные с динамикой работающей машины.

Ультразвуковой преобразователь. Преобразователи данного типа применяют для анализа в диапазоне частот свыше 20 кГц. Преобразователь настраивают на какую-либо конкретную частоту в пределах диапазона, например 25 кГц. Такой преобразователь принимает только упругие волны, производимые вследствие дефектов в конструкции машины, и не реагирует на движение узлов машины, связанных с работой трансмиссии. Подробнее данный вид преобразователей рассмотрен в [13].

Акустико-эмиссионный преобразователь. Преобразователи данного типа применяют для измерений в диапазоне частот более высоком, чем это позволяют сделать акселерометры и ультразвуковые преобразователи. Обычно диапазон частот измерений акустической эмиссии простирается от 50 кГц до нескольких мегагерц. Основу преобразователя составляет пьезоэлектрический кристалл, установленный с очень малым демпфированием, что обеспечивает очень высокий коэффициент преобразования на резонансе. Такие преобразователи воспринимают упругие волны, пришедшие сразу с нескольких направлений.

Тензодатчик. Данный преобразователь обычно применяют для контроля нагрузок в конструкции мачты или лопаток турбины, что выходит за область применения настоящего документа.

6.6.4 Установка преобразователей

Упругие волны распространяются во всех направлениях, поэтому выбор направления измерений в данном случае не столь важен. Однако важно, чтобы место установки датчика было рядом с областью нагрузки и по возможности ближе к источнику упругих волн. Обычно используют акселерометры или ультразвуковые преобразователи. При установке важно принимать во внимание прохождение волной границы физических сред. Особенно это касается ультразвуковых преобразователей, которые осуществляют измерения только в узкой полосе частот.

6.7 Контролируемые параметры для содержания частиц в масле

6.7.1 Общие положения

Необходимо различать два следующих вида контроля, связанных с определением характеристик смазочных масел.

Контроль качества масла. Контроль данного вида используют для оценки состояния масла, чтобы определить потребность в его замене. Контролируемыми параметрами являются процент содержания влаги в масле, его вязкость, диэлектрическая проницаемость (характеризующая степень окисления масла) и чистота масла, определяемая содержанием в нем частиц разного размера (см. [1]). Частицы, определяющие чистоту масла, очень малы по размерам, и их не следует путать с частицами износа в масле.

Контроль содержания частиц износа в масле. Наличие в масле частиц износа свидетельствует о развивающейся неисправности, связанной с механическими частями коробки передач. Обычно размер определяемых частиц превышает 40 мкм.

Хотя от качества масла зависит состояние деталей в коробке передач, предметом рассмотрения настоящего стандарта является выявление механических неисправностей трансмиссии ветрогенератора. Поэтому в нем рассматриваются только параметры, основанные на анализе содержания частиц износа, поскольку именно они свидетельствуют о механических неисправностях.

6.7.2 Контролируемые параметры

Наиболее часто встречающимися видами отказов коробки передач ветрогенератора являются сколы подшипниковых элементов и выкрашивание зубьев шестерен. Каждый из этих процессов приводит к появлению частиц износа в системе смазки. Поэтому контроль содержания таких частиц является удобным средством раннего обнаружения и количественной оценки внутренних повреждений подшипников и шестерен коробки передач ветрогенератора.

Установлено, что характер износа может быть описан следующими четырьмя характеристиками содержания частиц износа в масле:

a) концентрация частиц;

b) размер частиц;

c) морфологические признаки (форма, материал и цвет частиц);

d) состав частиц.

Поскольку концентрация частиц и их размер увеличиваются с износом деталей, они являются удобными параметрами для контроля степени и скорости износа. Эти характеристики могут быть получены датчиками в системе онлайн-контроля. Обычно такие датчики позволяют определять присутствие как ферромагнитных, так и неферромагнитных частиц. Морфологию и состав частиц исследуют отдельно по образцам масла. По этим характеристикам можно судить от типе износа и вероятном месте неисправности. Системой онлайн-контроля данные характеристики не определяют.

Обычными параметрами, определяемыми системой онлайн-контроля содержания частиц износа в масле, являются:

- число частиц определенного размера;
- общая масса частиц;
- размер частиц (для определения степени износа);
- изменение концентрации частиц на коротком интервале времени (час), т.е. при данных условиях работы ветрогенератора;
- изменение концентрации частиц на большом интервале времени (сутки), т.е. с усреднением по разным условиям работы ветрогенератора.

Рост повреждения оценивают через взвешенную сумму усредненных изменений концентрации на коротком и большом интервале времени.

6.7.3 Датчики частиц износа

Наиболее часто используемыми в системе контроля состояния коробки передач ветрогенератора являются датчики частиц износа индуктивного типа, встраиваемые в систему смазки коробки передач. При наличии нескольких систем смазки для одной коробки передач датчики встраивают в каждую из них. Датчик подсчитывает число металлических частиц, образующихся в результате сколов или выкрашиваний подшипников и зубчатых колес коробки передач.

Такой датчик включает в себя магнитную катушку, создающую магнитное поле, которое изменяется при прохождении через катушку частиц износа. Каждый раз, когда частица проходит через датчик, в катушке возбуждается импульс тока. Число импульсов соответствует числу прошедших частиц.

Датчик реагирует на любые металлические частицы, как ферромагнитные, так и неферромагнитные. Обычно частицы группируют по классам в зависимости от их размеров. Устанавливают датчик частиц с той стороны масляного фильтра, на которой осаждаются загрязняющие частицы.

7 Межконтрольный интервал

7.1 Базовые стандарты

Общую информацию в отношении выбора межконтрольного интервала можно найти в [5] и [11].

7.2 Факторы, влияющие на межконтрольный интервал

Межконтрольный интервал представляет собой промежуток времени между двумя последовательными измерениями контролируемого параметра. Значение межконтрольного интервала зависит от:

- типа определяемого вида отказа;
- типа контролируемых параметров, используемых для выявления отказа. Некоторые параметры определяют исходя из того, чтобы обеспечить раннее обнаружение отказа конкретного вида. Такие параметры часто указывают на наличие неисправности за несколько месяцев до наступления отказа. Другие параметры предназначены для оценки состояния по общему уровню вибрации узла. Изменения таких параметров происходят только за несколько недель или даже дней до отказа;
- типичной формы развития неисправности для отказа данного вида: экспоненциальной или линейной.

На рисунке 6 показано изменение разных контролируемых параметров, используемых для выявления отказа одного вида.

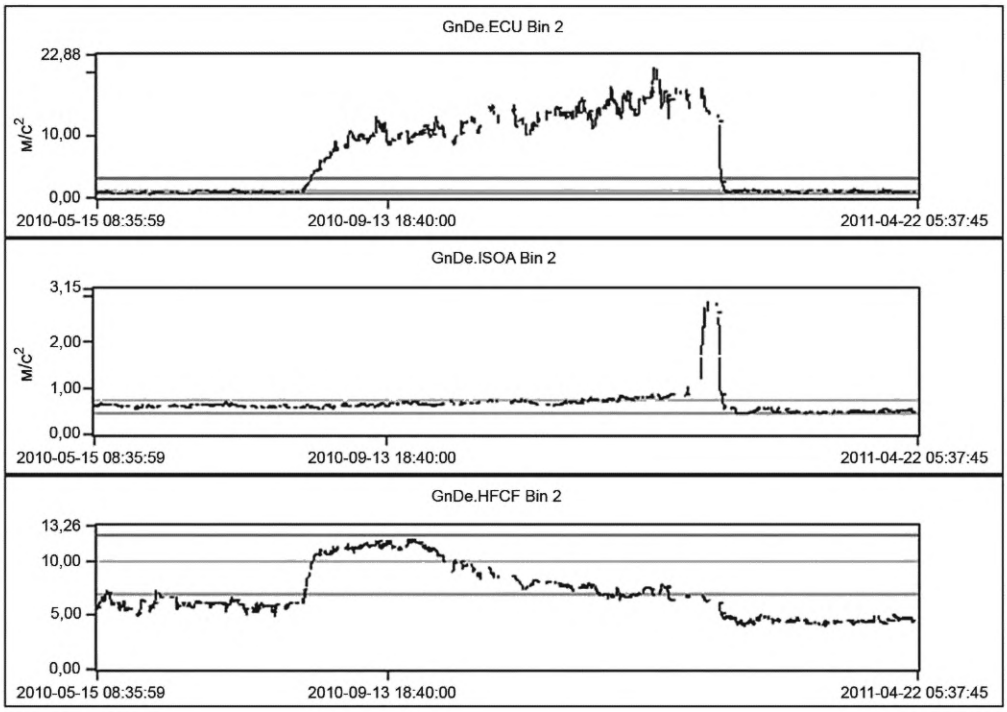


Рисунок 6 — Определение одной и той же неисправности по трем разным контролируемым параметрам

Примечание — Трем разным контролируемым параметрам, показанным на рисунке 6 (огибающей широкополосного сигнала GnDe.ECU, общей вибрации по [3] GnDe.ISOA и пик-фактору GnDe.HFCF), соответствуют три разные оценки времени до отказа. Резкое падение уровня вибрации связано с заменой дефектного подшипника. Цветным линиям на рисунке соответствуют три предельных уровня вибрации (см. [3]): зеленая линия — УВЕДОМЛЕНИЕ, желтая линия — ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ, красная линия — ОСТАНОВ.

Из рисунка 6 следует, что выбор контролируемого параметра является важным элементом оценки остаточного ресурса, и ему соответствует свой межконтрольный интервал. Оценка времени до отказа, сделанная по измерениям огибающей и пик-фактора, на месяцы превышает ту, что получена по измерениям общей вибрации. Скорость изменения общей вибрации показывает, что для данного параметра правильный выбор межконтрольного интервала является более критичным.

Рисунок 6 показывает также, что выбор параметра может быть использован для выражения критичности неисправности. Когда уровень огибающей и пик-фактор начинают расти, состояние неисправности далеко от критического. Однако начало роста общей вибрации уже свидетельствует о необходимости рассмотреть возможность ремонтных работ. При большом уровне общей вибрации риск отказа становится высок.

На оценку времени до отказа может повлиять режим работы ветрогенератора и число пусков и остановов. Поэтому целесообразно проводить измерения параметров для всех режимов работы и обеспечивать значительное число измерений параметров между каждыми пусками и остановами ветрогенератора.

Как видно из рисунка 6, общую вибрацию в широкой полосе частот следует измерять с очень малыми интервалами, что обеспечит хорошее понимание текущего состояния ветрогенератора. Другие, более сложные, параметры могут обеспечить большее значение оценки времени до отказа и требуют менее частых измерений, например раз в месяц. На практике, однако, системы контроля не налагают жестких ограничений на объем хранимой информации, поэтому запись данных можно осуществлять чаще. Сохранение результатов измерений, выполненных несколько раз в течение дня, повышает вероятность того, что эти измерения были получены в разных режимах работы машины. К таким данным можно потом применить технику экспоненциального или медианного усреднения, что обеспечит внесение в общую базу на сервере представительных данных с межконтрольным интервалом в несколько часов.

8 Критерии формирования оповещений системы контроля

8.1 Базовые стандарты

Общую информацию в отношении установления уровней уведомления и предупреждения можно найти в [3], [5], [6] и [18].

8.2 Общие положения

Формирование сигналов системы оповещения по результатам измерений контролируемых параметров ветрогенератора возможно на основе:

a) значения параметра (признака неисправности);

b) любого существенного изменения в значении параметра;

c) скорости изменения параметра.

Критерии оценки вибрационного состояния имеют вид предельных значений для каждого контролируемого параметра, по достижении которых системой оповещения формируются соответствующие сигналы. Как правило, сигналы оповещения появляются после превышения предельных значений, однако существуют параметры, для которых соответствующие сигналы формируются при их уменьшении ниже заданного уровня (например, собственная частота колебаний мачты или температура масла в коробке передач). Система контроля допускает установление произвольного числа предельных состояний, однако наиболее часто используют два из них:

- **уровень уведомления.** Достижение контролируемым параметром этого уровня свидетельствует о выявлении характерного признака неисправности машины. Если данный уровень установлен правильно, то его достижение параметром не требует принятия незамедлительных мер, но дальнейшие операции по техническому обслуживанию следует планировать с учетом появившегося признака (см. также раздел 13);

- **уровень предупреждения.** Продолжающиеся изменения параметра, в ходе которых он достигает этого уровня, рассматривают как достаточно серьезные или даже неприемлемые. Если данный уровень установлен правильно, то его достижение параметром влечет за собой планирование ремонтных работ, которые должны быть осуществлены в короткие сроки.

При приемке новой машины оценивают ее вибрацию относительно некоторого заданного и заранее согласованного допустимого уровня. После ввода машины в эксплуатацию определяют свойственную ей вибрацию в нормальном режиме работы. При этом оценивают не только абсолютный уровень вибрации, но и существенные изменения в ней.

8.3 Установление уровней уведомления и предупреждения для нового ветрогенератора

Контроль вибрационного состояния ветрогенератора следует осуществлять с момента его приемки. Поскольку у новой машины история наблюдений вибрации отсутствует, исходные уровни уведомления и предупреждения принимают по согласованию заинтересованных сторон. Такие уровни «по умолчанию» могут быть установлены не для всех контролируемых параметров, поскольку для ряда из них характерен высокий разброс значений от машины к машине. В качестве параметра, для которого могут быть заданы начальные уровни, хорошо подходит мощность сигнала вибрации (одной из величин движения) в широком диапазоне частот. Этот параметр в меньшей степени подвержен вариативности, и для него установлены рекомендации рядом действующих стандартов.

Примеры

1 Начальные уровни предупреждения по среднеквадратичным значениям величин движения установлены стандартом [3], но они касаются только части возможных контролируемых параметров. Рекомендации по предельным значениям для коробок передач можно найти в руководстве [18].

2 Начальные уровни уведомления и предупреждения могут быть установлены из анализа вибрации ветрогенераторов того же типа. При установлении начальных уровней принимают во внимание среднее значение и стандартное отклонение предельных уровней по выборке таких машин.

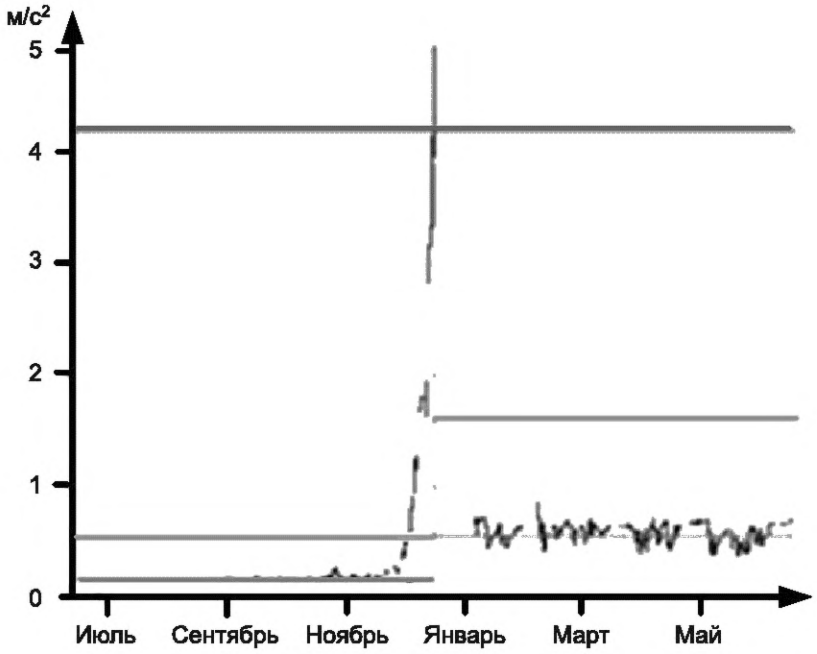
8.4 Установление уровней уведомления и предупреждения для нормального режима работы ветрогенератора

После того, как машина принята в эксплуатацию и демонстрирует нормальную работу в заданном режиме, установленные начальные уровни корректируют с учетом реально наблюдаемых значений контролируемых параметров. Уровень уведомления должен быть достаточно низким, чтобы не пропустить появление признаков неисправности. Однако тот уровень, что был установлен для новой машины, может оказаться слишком низким после ввода машины в эксплуатацию. Его следует скорректировать до реалистичных значений, чтобы он превышал шумовой порог. Это позволит избежать ложных оповещений системы контроля.

Иногда уровень вибрации машины, введенной в эксплуатацию, изменяется скачкообразным образом, и при этом данное изменение нельзя связать с каким-либо существенным изменением состояния узла машины. В таких случаях некоторое время следует наблюдать за новым уровнем вибрации, чтобы решить, является ли он достаточно стабильным и характеризует ли нормальную работу машины. При положительном ответе на данный вопрос предельные значения соответствующим образом корректируют.

8.5 Установление уровней уведомления и предупреждения после замены узла или детали

При замене какого-либо узла или детали ветрогенератора, например подшипника электрогенератора или соединительной муфты, уровень уведомления следует пересмотреть. В противном случае возможно, что существенные изменения в состоянии машины не будут выявлены своевременно (см. пример на рисунке 7).



Примечание — Из рисунка видно, что уровни УВЕДОМЛЕНИЯ и ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ, которым соответствуют линии зеленого и желтого цветов (см. примечание в 7.2) нуждаются в коррекции. Разница в уровнях вибрации до и после ремонта указывает на низкое качество ремонтных работ.

Рисунок 7 — Пример вибрации до и после замены муфты высокоскоростного вала

9 Адаптация к условиям работы ветрогенератора

9.1 Общие положения

Чтобы дать возможность использовать в целях контроля состояния измерения, выполненные в разных условиях работы ветрогенератора, был разработан принцип адаптации к этим условиям. Ветрогенератору приходится работать при самых разных ветровых обстановках, т. е. в широком диапазоне нагрузок на его механическую конструкцию. Принцип адаптации применяют для обеспечения надежных и повторяемых результатов измерений, которые могут быть использованы для обнаружения развивающихся неисправностей, во всем диапазоне нагрузок с малым риском появления ложных оповещений. Указанный принцип заключается в том, что шкалу характеристики, описывающей условия работы ветрогенератора, разбивают на классы значений. Сравнению подлежат лишь те значения контролируемого параметра, которым соответствует один и тот же класс условий работы.

9.2 Пример реализации принципа адаптации

В рассматриваемом примере в качестве характеристики, описывающей условия работы ветрогенератора, выбрана активная мощность. Данная характеристика лучше подходит для адаптации результатов измерений вибрации чем скорость ветра, поскольку обнаруживает большую корреляцию с вибрацией и механическими напряжениями в узлах ветрогенератора. Кроме того, использование характеристики активной мощности гарантирует, что для оценки контроля состояния использованы только те измерения вибрации, которые выполнены в условиях производства ветрогенератором полезной энергии.

На рисунке 8 показаны две разновидности реализации принципа адаптации к условиям работы ветрогенератора.

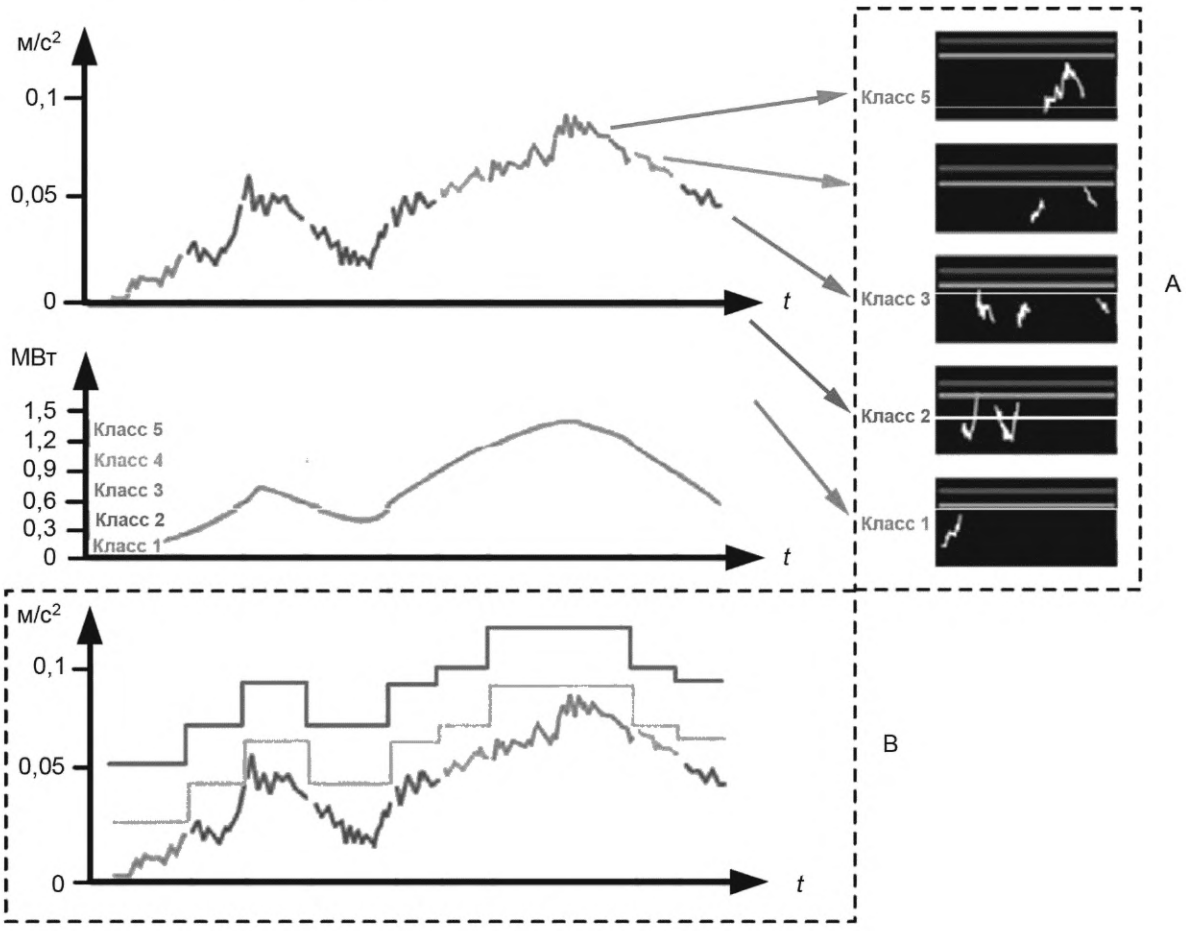
10 Места установки преобразователей

10.1 Базовые стандарты

Общую информацию в отношении мест установки преобразователей можно найти в [2], [3], [14] и [16].

10.2 Расположение преобразователей вибрации

Число преобразователей, используемых для контроля состояния трансмиссии ветрогенератора, зависит от результатов FMSA. Следует использовать только те преобразователи, сигналы с которых будут использованы для определения контролируемых параметров. Число преобразователей и их местоположение (под которым понимают точку установки на машине вместе с направлением измерений вибрации) должно обеспечивать надежное определение составляющих вибрации на характерных частотах работы трансмиссии: частотах вращения, зубцовых частотах, частотах дефектов подшипников и т.п. Иногда целесообразно провести пробные измерения для разных мест установки преобразователя, чтобы выбрать из них оптимальное.



A — адаптация с использованием разбиения на классы по уровням активной мощности (участки сигнала вибрации разносят по разным классам и сопоставляют их с уровнем предупреждения для каждого класса); B — адаптация с использованием переменного уровня предупреждения (уровень предупреждения зависит от активной мощности)

Рисунок 8 — Два способа адаптации к условиям работы ветрогенератора

При выборе места установки преобразователя важно убедиться, что вибрация к нему поступает непосредственно от источника своего зарождения.

Рекомендуется использовать следующие базовые правила:

а) устанавливать преобразователь по возможности ближе к месту зарождения вибрации исследуемого узла;

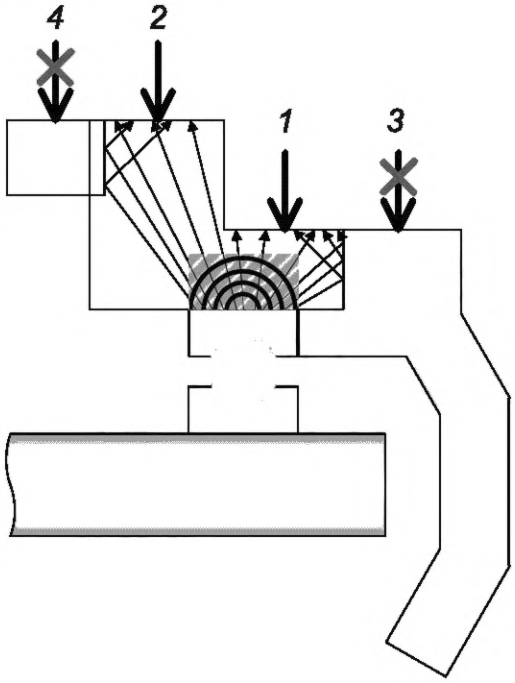
b) устанавливать преобразователь в зоне максимальной нагрузки (области максимальной нагрузки для разных режимов работы ветрогенератора определяют заблаговременно);

c) избегать установки преобразователя в местах, которые вибрация от источника может достичь только после пересечения границы между двумя разными материалами (см. рисунок 9).

Однако зачастую число мест установки преобразователей ограничено возможностью доступа к ним или требованиями изготовителей соответствующих узлов трансмиссии (например, коробки передач).

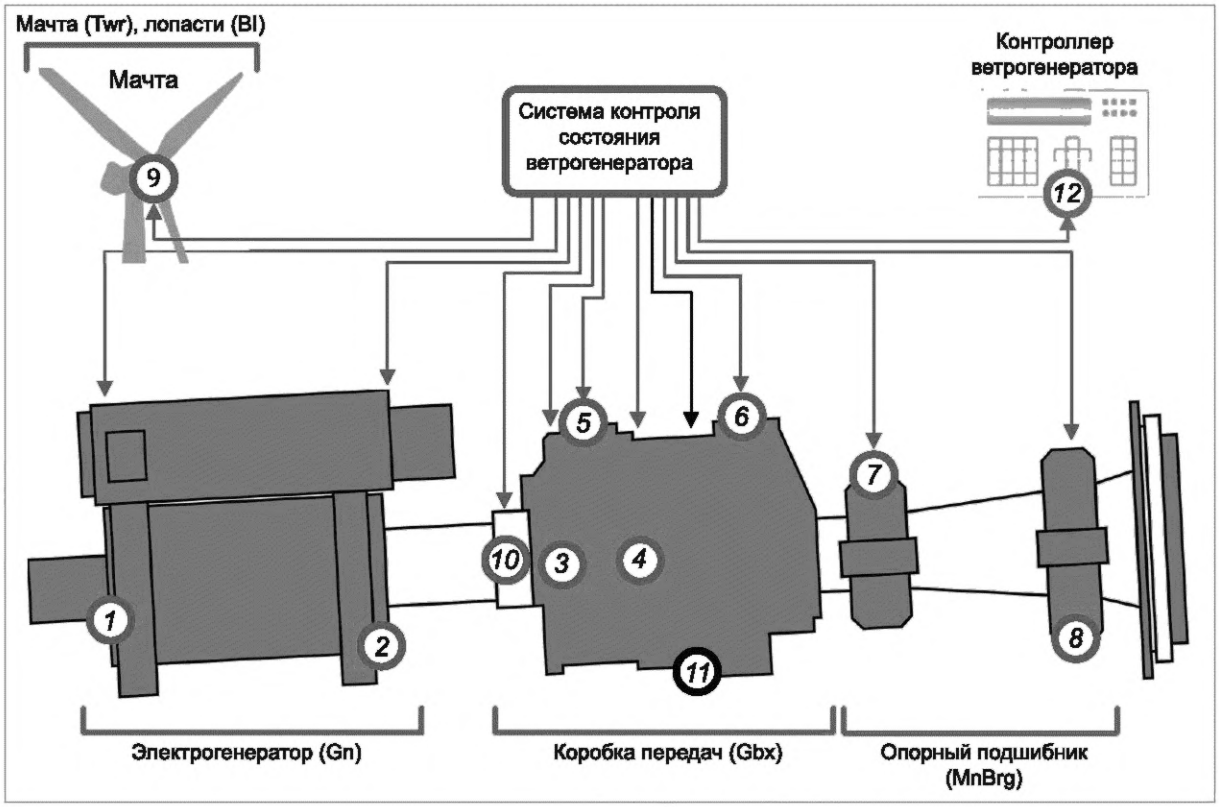
Дополнительная информация об установке пьезоэлектрических акселерометров приведена в справочнике [19].

На рисунке 10 показан пример выбора мест установки акселерометров, датчика частоты вращения и датчиков частиц износа на ветрогенераторе с коробкой передач, включающей одну планетарную и две червячные передачи, и двумя опорными подшипниками. Тот же принцип выбора местоположений преобразователей может быть применен для любой другой конструкции трансмиссии (возможно, с использованием дополнительных преобразователей).



1 — прямая передача вибрации (рекомендуемая точка измерений); *2* — прямая передача вибрации (рекомендуемая точка измерений); *3* — передача вибрации через границу раздела сред (не рекомендуется в качестве точки измерений); *4* — передача вибрации через границу раздела сред (не рекомендуется в качестве точки измерений)

Рисунок 9 — Два способа адаптации к условиям работы ветрогенератора



1—9 (обведены красным) — точки установки преобразователей вибрации; *10* (обведена синим) — точка установки датчика скорости (тахометра); *11* (обведена черным) — точка установки датчика частиц износа; *12* (обведена оранжевым) — получение параметров рабочего процесса от контроллера

Рисунок 10 — Точки установки преобразователей на трансмиссии ветрогенератора

10.3 Расположение датчиков упругих волн

Датчики упругих волн должны быть установлены по возможности ближе к зоне нагрузки (см. точки 7 и 8 на рисунке 10).

10.4 Расположение датчиков частиц износа

Датчики частиц износа обычно устанавливают перед впуском масляного фильтра. Однако выбор места может зависеть от конструкции коробки передач (например, при необходимости контроля во вторичном контуре системы смазки).

10.5 Соглашение об обозначении мест установки преобразователей

Поскольку ветропарк обычно включает в себя большое количество ветрогенераторов, и каждый из них снабжен преобразователями разных типов, установленных в разных местах, важно установить единое соглашение об обозначении мест установки и типах преобразователей. Подробная информационная модель системы контроля состояния ветрогенераторов дана в [14]. В нем же приведено систематизированное и удобное в интерпретации обозначение мест установки преобразователей вместе с параметрами, которые они измеряют. Несколько примеров таких обозначений приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Соглашение по обозначениям в соответствии с [14]

№	Место установки преобразователя	Обозначение согласно [14]	Тип преобразователя/направление измерений
1	Неприводной конец вала электрогенератора	GnNDe-ACR	Акселерометр/радиальное
2	Приводной конец вала электрогенератора	GnDe-ACR	Акселерометр/радиальное

Окончание таблицы 3

№	Место установки преобразователя	Обозначение согласно [14]	Тип преобразователя/направление измерений
3	Задний подшипник высокоскоростного вала коробки передач	GbxHssRr-ACR	Акселерометр/радиальное
4	Передний подшипник высокоскоростного вала коробки передач	GbxHssFr-ACR	Акселерометр/радиальное
5	Промежуточная передача	GbxIss-ACR	Акселерометр/радиальное
6	Первая планетарная передача	Gbx1Ps-ACR	Акселерометр/радиальное
7	Задний опорный подшипник	MnBrgRr-ACR MnBrgRr-SWR	Акселерометр/радиальное Датчик упругих волн/радиальное
8	Передний опорный подшипник	MnBrgFr-ACR MnBrgFr-SWR	Акселерометр/радиальное Датчик упругих волн/радиальное
9	Мачта (гондола)	NacXdir-AC NacZDir-AC	Акселерометр гондолы
10	Высокоскоростной вал	HssShf-MPR	Индуктивный тахометр/ радиальное
11	Контур смазки коробки передач	GbxOilFil-OD	Датчик частиц износа (у масляного фильтра)

11 Построение базовой линии

11.1 Общие положения

После приемки ветрогенератора рекомендуется собрать начальные записи временных сигналов со всех преобразователей, которые позволяют это сделать, в целях:

- начальной диагностики. Поскольку процедуры контроля состояния основаны на выявлении разностей в контролируемых показателях и признаках неисправностей, важно знать, находится ли ветрогенератор в хорошем техническом состоянии в момент ввода в эксплуатацию;
- для сохранения базовой линии ветрогенератора. С базовой линией можно затем сопоставлять все временные сигналы, записанные в будущем. Если системой контроля впоследствии будет пропущен отказ какого-либо вида, то важно иметь возможность вернуться назад и проверить, были ли какие-либо признаки неисправности на момент начала эксплуатации.

Если в процессе ремонта была выполнена замена каких-либо узлов или деталей ветрогенератора, то базовая линия должна быть получена заново.

Запись базовой линии нужно сохранять все время до вывода ветрогенератора из эксплуатации.

Важно убедиться, что временной сигнал, формирующий базовую линию, был записан в штатных режимах работы ветрогенератора.

Целесообразно временной сигнал базовой линии дополнить соответствующими значениями всех контролируемых параметров, включая параметры рабочего процесса, характеризующие режим работы ветрогенератора.

11.2 Длительность временного сигнала базовой линии

Минимальная длина записи временного сигнала базовой линии T_w, с, может быть ориентировочно определена по формуле

$$T_w = 10\ (1/v_r), \qquad (1)$$

где v_r — частота вращения турбины, Гц.

Такой выбор длины записи можно рассматривать как компромисс между желанием обеспечить высокую точность измерений и при этом ограничить объем данных исходя из практической целесообразности. От длины записи зависит разрешение в частотной области — чем длиннее запись, тем выше разрешение.

11.3 Повторяемость и стабильность временного сигнала

Для обеспечения повторяемости и стабильности временного сигнала необходимо, чтобы в процессе записи временного сигнала отсутствовали значительные изменения частоты вращения или нагрузки ветрогенератора. В систему контроля состояния рекомендуется ввести допуски на эти характеристики, чтобы она автоматически исключала записи временного сигнала, в процессе которых характеристики выходят за пределы допуска. Даже если система контроля использует порядковый анализ, приводящий частоты сигнала к частоте вращения, при изменении частоты вращения форма сигнала может изменяться существенно, особенно если это сопровождается изменением нагрузки.

На рисунке 11 показан выбор временного сигнала в соответствии с критерием стабильности. Если условием записи сигнала является нахождение в пределах заданного диапазона значений (класса) какого-либо параметра рабочего процесса, то этот параметр должен оставаться в пределах этого класса и не должен изменяться со скоростью быстрее заданной на всем периоде записи базовой линии. При нарушении этих условий соответствующие измерения должны быть исключены.

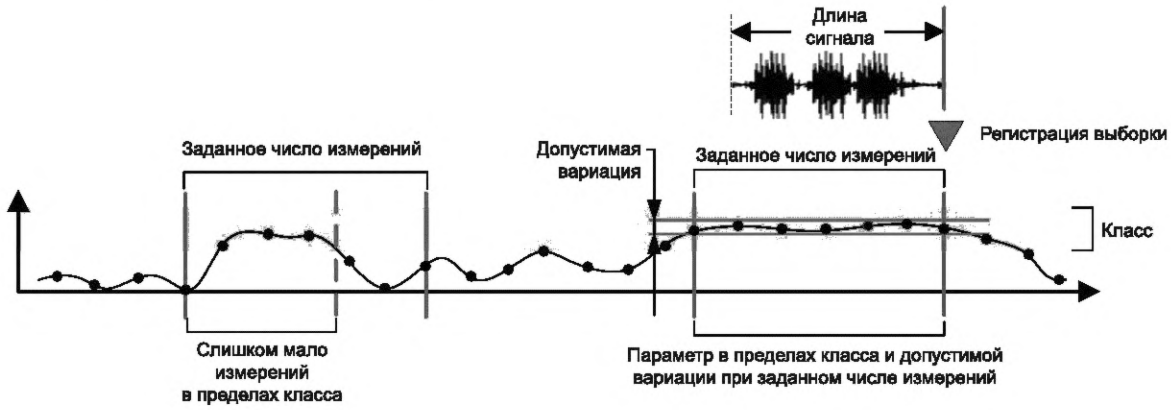


Рисунок 11 — Выбор участка записи временного сигнала в соответствии с критериями стабильности

11.4 Частота дискретизации временного сигнала

Частота дискретизации временного сигнала зависит от диапазона частот анализа для данного узла или части ветрогенератора. Общепринято, что частота дискретизации должна в 2,56 раза превышать верхнюю границу диапазона частот анализа. Для разных узлов машины диапазон частот анализа может быть разным. Так, при формировании сигнала базовой линии высокоскоростной ступени коробки передач следует иметь в виду, что верхняя граница диапазона частот анализа должна приблизительно в 4—5 раз превышать максимальную частоту зубчатого зацепления, что позволит оценить высшие гармоники этой частоты и соответствующие боковые полосы (см. также [6]).

11.5 Проверка сформированной базовой линии

После построения базовой линии рекомендуется:

- оценить форму базовой линии с точки зрения наличия в ней характерных ударов, по которым можно сделать быстрое заключение о наличии неисправностей;
- сравнить построенную базовую линию с базовыми линиями других ветрогенераторов того же типа.

12 Диагностирование

12.1 Базовые стандарты

Общую информацию в отношении процедур диагностирования, включая поиск причин отказов, можно найти в [7] и [11].

12.2 Общие положения

Диагностирование представляет собой ретроспективный процесс, в котором по имеющимся на данный момент данным оценивают характер неисправности, степень ее развития и вызвавшие ее причины. Результаты диагностирования являются входными данными процесса прогнозирования, целью которого является оценка остаточного ресурса узла.

В процессе диагностирования используют информацию о машине, которую, так же как и данные измерений, предоставляет система контроля состояния.

12.3 Данные о ветрогенераторе

Результаты измерений вибрации, используемые в целях диагностирования, должны сопровождаться информацией о машине и ее динамическом поведении, такой как частота вращения, число зубьев шестерен, характерные частоты элементов подшипников качения.

Если для диагностирования используют результаты анализа частиц износа в масле, то они должны сопровождаться информацией о маслопроводе, скорости расхода масла и составе металла, из которого изготовлены части ветрогенератора.

12.4 Запись временных сигналов в целях диагностирования

Чтобы в полной степени использовать возможности всех инструментов диагностирования запись временных сигналов рекомендуется осуществлять с высоким разрешением. Регулярные записи сигналов с их последующим долгосрочным хранением дают возможность исследовать виды отказов, которые могут не выявляться системой контроля состояния на основе существующего набора контролируемых параметров. В результате могут быть получены рекомендации об использовании новых или дополнительных контролируемых параметров, что позволит улучшить результативность системы диагностирования.

Для углубленного диагностирования важно:

- запись сигнала вибрации вести одновременно с записью частоты вращения турбины. Это позволит осуществить порядковый анализ, привязанный к частоте вращения любого вала коробки передач. Сигналы с датчика частоты вращения должны обладать достаточно высоким разрешением по углу поворота вала, чтобы обеспечить привязку к частоте вращения другого вала;
- синхронно с записью временного сигнала вести запись рабочих параметров процесса, таких как активная мощность, скорость ветра, азимутальный угол, в форме дискретных значений или временных рядов.

Временные сигналы следует записывать синхронно по нескольким каналам в зависимости от конструкции трансмиссии (например, со всех преобразователей, установленных на коробке передач). Это позволит исследовать одновременно происходящие процессы в машине и связь между разными событиями.

Рекомендации, приведенные в отношении длительности временного сигнала и частоте его дискретизации при построении базовой линии, справедливы также для временных сигналов, используемых в целях диагностирования.

12.5 Регулярная запись временных сигналов

Процесс диагностирования будет более гибким, если вести записи временных сигналов со всех преобразователей через определенные промежутки времени.

Интервал между записями зависит от:

- исследуемого узла машины, т.е. от P-F-интервала (результат FMSA);
- полосы пропускания сети;
- возможностей по хранению информации на сервере данных.

Важно, чтобы система контроля состояния имела возможность записывать временные сигналы, соответствующие заданным условиям работы ветрогенератора.

12.6 Запись временных сигналов по требованию

Чтобы поддержать процесс диагностирования, система контроля состояния должна обеспечивать возможность помимо записей через регулярные промежутки времени проводить записи сигналов по требованию, когда анализ требует дополнительных данных.

13 Прогнозирование

13.1 Базовые стандарты

Общую информацию в отношении процедур прогнозирования можно найти в [9].

13.2 Общие положения

Прогнозирование — важная составляющая работы системы контроля. В отличие от диагностирования, ретроспективного по своей природе, процедура прогнозирования сфокусирована на событиях, которые произойдут в будущем. Работа системы контроля только тогда может считаться в полной степени эффективной, если она позволяет предсказать остаточный ресурс (RUL), т.е. количество рабочих часов до достижения узлом предельного состояния. Функциональный отказ узла не обязательно связан с катастрофическими последствиями для машины. Как правило, он влечет за собой невозможность работы машины согласно своему назначению (например, с заданной производительностью).

Для построения надежного прогноза необходим большой объем надежных данных, собранных от разных источников. Выполнение этого требования облегчается применением IIoT, предоставляющему платформу для сбора и хранения данных и позволяющему пользователю сконцентрировать свои усилия на разработке собственно методов прогнозирования.

Методы прогнозирования могут быть классифицированы в зависимости от типа используемой информации и способов ее обработки:

- тип I: на основе теории надежности. Это метод предполагает проведение статистического анализа большого количества историй отказов и соответствующих данных лабораторных испытаний для определения вероятности отказа, например с использованием распределения Вейбулла. Он позволяет получить оценку срока службы некоторого усредненного узла в некоторых усредненных условиях работы машины и применить эту оценку в отношении исследуемого узла того же типа;
- тип II: на основе событий. В данном методе рассматривают условия работы машины, такие как температура, нагрузка, скорость, число пусков и остановов. Метод основан на расчете срока службы среднего узла при заданных условиях применения машины;
- тип III: на основе измерений. В данном методе для оценки RUL узла применяют описание его деградации через значения одного или нескольких контролируемых параметров. Используемая информация позволяет уменьшить неопределенность предсказания RUL, изначально полученную на основе теории надежности.

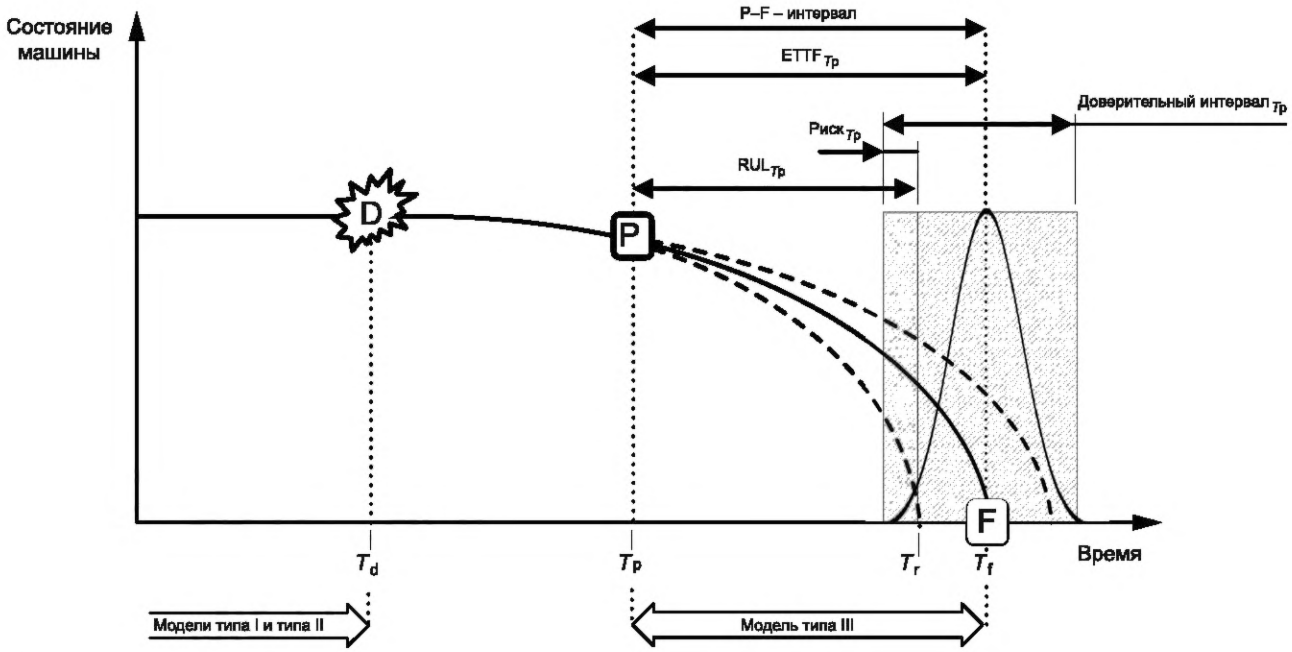
Модели прогнозирования типов I и II могут быть отнесены к физическим моделям, а модель типа III — к моделям на основе данных.

Модели типов I и II могут быть объединены в гибридную модель, рассматривающую изменения от прошлого к будущему за время жизненного цикла отдельного узла.

13.3 Модель типа I

Традиционный подход теории надежности основан на распределении событий для совокупности идентичных объектов. Наиболее часто в качестве такого распределения используют распределение Вейбулла, поскольку оно позволяет интерпретировать такие данные как время до замены или отказа для совокупности объектов. Однако поскольку статистические выводы относятся к усредненному объекту в усредненных условиях эксплуатации, применение их к конкретному узлу сопровождается большой неопределенностью.

На рисунке 12, показывающем определение RUL в ходе эксплуатации машины, модель на основе теории надежности работает на начальном плоском участке кривой до начала развития неисправности (обозначенного точкой D). Такая модель может быть полезным инструментом для оценки стоимости будущих работ по техническому обслуживанию при планировании бюджета. Особенно она эффективна при планировании для парка ветроустановок, в котором используется большое число однотипных агрегатов.



D — начало развития неисправности; P — точка потенциального отказа; F — точка отказа; — время начала развития неисправности (до этого момента для оценки RUL применяют подходы на основе теории надежности); T_p — время регистрации потенциального отказа; T_f — время наступления отказа (на интервале между T_p и T_f применяют модель на основе данных наблюдения за состоянием машины); T_r — граница зоны риска для оценки RUL с учетом доверительного интервала для ETTF

Рисунок 12 — Применение методов прогнозирования разных типов

Модель типа I малопригодна для точной оценки RUL после зарождения неисправности. В этом случае вместо нее следует использовать модель на основе данных.

13.4 Модель типа II

Недостатком модели, основанной исключительно на методах теории надежности, состоит в том, что она не принимает во внимание условия работы конкретной машины, а распространяется только на типичный объект в типичных условиях эксплуатации. Модель на основе событий принимает во внимание условия работы конкретной машины, поскольку при ее эксплуатации в жестких условиях следует ожидать более короткого срока службы, чем при работе в щадящем режиме.

Данная модель использует предварительные наблюдения за историей работы машины, включая произведенную ею энергию, момент вращения, температуру и данные, характеризующие время до отказа, чтобы предсказать срок службы узла.

Модель II включает в себя сбор данных, связанных с произошедшими событиями, такими как замена узлов или деталей или их отказы. Некоторые модели включают имитацию работы турбины в условиях, наблюдавшихся к текущему моменту времени, чтобы получить более реалистичную оценку ожидаемого срока службы. Однако данный подход также обеспечивает только усредненные оценки для совокупности идентичных объектов в идентичных условиях эксплуатации, что позволяет планировать время до технического обслуживания. На рисунке 12, показывающем определение RUL в ходе эксплуатации машины, модель на основе событий также работает на начальном плоском участке кривой до начала развития неисправности (обозначенного точкой D). Такая модель может быть полезным инструментом для оценки стоимости будущих работ по техническому обслуживанию при планировании бюджета. Особенно она эффективна при планировании для парка ветроэнергетических установок, в котором используется большое число однотипных агрегатов.

Модель типа II малопригодна для точной оценки RUL после зарождения неисправности. В этом случае вместо нее следует использовать модель на основе данных.

13.5 Модель типа III

Данную модель прогнозирования используют в ситуации, когда получены данные о развитии неисправности и месте ее развития. Основные принципы оценки RUL показаны на рисунке 12. В момент времени T_p (точка, в которой может быть выявлен потенциальный отказ) выполняют оценку времени до отказа (ETTF). После получения ETTF встает следующий вопрос: когда проводить корректирующие мероприятия с учетом надежности этой оценки. Критической характеристикой здесь является доверительный интервал для ожидаемого времени отказа. В идеале техническое обслуживание следует провести до наступления отказа, но вместе с тем максимально продлить возможность эксплуатации узла, в котором развивается неисправность. Найти баланс между указанными факторами — задача управления рисками. Ширина доверительного интервала в высокой степени зависит от рассматриваемого узла и вида отказа.

Оценка RUL опирается на набор контролируемых параметров, из которых одни просто свидетельствуют о наличии неисправности, а другие — о степени ее развития. Во внимание следует принимать также условия работы ветрогенератора после поступления оповещения о развитии неисправности. Надежную оценку RUL может помочь получить только богатый опыт диагностирования в аналогичных ситуациях. После того, как оценка RUL сделана, дальнейшую работу по контролю развивающейся неисправности можно поручить менее квалифицированному персоналу. Допустима даже некоторая автоматизация этого процесса.

Рекомендуется получать новые оценки ETTF через регулярные промежутки времени. Это позволит уточнить доверительный интервал для времени отказа и даже увеличить оценку RUL, что дает возможность отложить проведение ремонтных работ до более подходящего для этого времени.

14 Эффективность системы контроля состояния

14.1 Базовые стандарты

Общую информацию по конструированию систем контроля состояния и характеристикам эффективности ее работы можно найти в [8], [10] и [12].

14.2 Общие положения

Процедура FMECA, рекомендованная [10] и руководствами по выбору методов выявления видов отказов узлов с последующим диагностированием, в качестве основных критериев рассматривает:

a) стоимость системы контроля;
b) способность обнаружения неисправностей;
c) комплексность методов контроля;
d) наличие ресурсов и квалификации персонала, занимающегося контролем.

Все перечисленное сопоставляется с выгодами, которые может принести система контроля в части минимизации потерь продукции ветрогенератора. Результат FMECA используют для оценки эффективности работы системы мониторинга и эффективности затрат.

14.3 Оценка эффективности работы системы контроля

Оценку эффективности систем контроля состояния можно оценить в ходе процедуры FMECA, результатом которой является число приоритета контроля $n_{MP,\ rel}$ для каждого вида отказа. Значение $n_{MP,\ rel}$ показывает, насколько критичным является отказ каждого вида и, соответственно, какую выгоду можно ожидать от выявления и наблюдения за приводящей к нему неисправностью. Идея применения показателя основана на том, что правильное и своевременное определение видов отказов способствует росту инвестиций в создание систем контроля. В связи с этим приоритет отдается контролю отказов тех видов, которые наиболее просты для обнаружения, обеспечиваются простыми средствами и не предъявляют слишком высоких требований к квалификации обслуживающего персонала. Попытка обнаружить нетипичные виды отказов часто ведет к появлению ложных сигналов предупреждения и, как следствие, к неоправданным посещениям ветроэнергетической установки бригадой обслуживания, что в конечном итоге повышает стоимость обслуживания ветрогенератора.

На рисунке 13 показано, как сокращается число обнаруживаемых неисправностей при отказе от измерений ряда контролируемых параметров. Получение некоторых параметров связано с применением сложных методов обработки, дорогостоящих преобразователей или их бывает сложно оценить в нормальном режиме работы машины.

На основе отношения между суммой чисел приоритета для всех видов отказа и суммой чисел приоритета для видов отказа, рассматриваемых системой контроля, можно получить оценку эффективности системы контроля E по формуле

$$E = \frac{\sum_{D_F} n_{MP,rel}}{\sum_{F} n_{MP,rel}}, \quad (2)$$

где F — все возможные виды отказов, определенные в результате FMECA;

D_F — все виды отказов, включенные в систему контроля (подмножество F);

$n_{MP, rel}$ — число приоритета контроля данного вида отказа, определенное в результате FMECA.

Расчет числа приоритетов учитывает такие показатели, как (см. [10]):

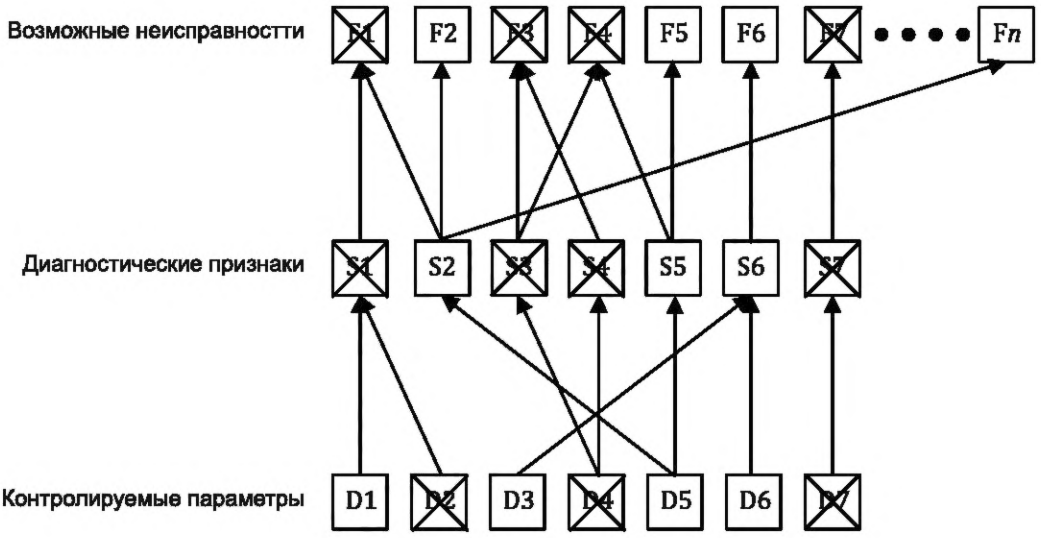
a) частоту наблюдения отказов (входит в показатель критичности f_{CR});

b) вторичные повреждения (входит в показатель критичности f_{CR});

c) затраты на ремонт (входит в показатель критичности f_{CR});

d) производственные потери (входит в показатель критичности f_{CR});

e) приоритет вида отказа f_{FMP} (надежность постановки диагноза).



D — контролируемый параметр; D перечеркнутое — контролируемый параметр отсутствует (не определяется системой контроля); S — диагностический признак; S перечеркнутое — диагностический признак не подтвержден (недостаточно контролируемых параметров); F — возможная неисправность; F перечеркнутое — необнаруживаемая неисправность (ввиду отсутствия диагностических признаков)

Примечание — Неисправность может быть обнаружена только при наличии диагностических признаков, т.е. при наличии всех соответствующих контролируемых параметров.

Рисунок 13 — Соотношение между возможными неисправностями, диагностическими признаками и контролируемыми параметрами

14.4 Оценка эффективности затрат

14.4.1 Общие положения

Чтобы количественно оценить потенциальный эффект от затрат на внедрение системы контроля, необходимо знать критичность контролируемой машины, критичность видов отказа и предупредительные меры, которые могут быть приняты.

Ниже рассматривается расчет ожидаемой эффективности для двух моделей:

a) простой модели, учитывающей только время простоя ветрогенератора и неполученный от этого доход;

b) расширенной модели, в которой помимо времени простоя учитывают также затраты на ремонт и доставку запасных частей.

14.4.2 Простая модель

В этой модели сравниваются потери при использовании двух разных стратегий: эксплуатации оборудования вплоть до его отказа и эксплуатации оборудования с использованием системы контроля, которая позволяет запланировать и провести восстановительные работы, не дожидаясь отказа оборудования. Для расчетов по данной модели необходим минимальный объем информации, которая может быть получена по результатам работы типичных систем контроля.

Сокращение времени простоя за счет заблаговременного обслуживания по показаниям системы контроля рассчитывают по формуле

$$DTS = [(DT - RD)ADR], \quad (3)$$

где DT — ожидаемое время простоя в отсутствии системы контроля (стратегия эксплуатации до отказа);

RD — время, необходимое для проведения ремонтных работ по замене узла, когда система контроля сообщила о его развивающейся неисправности (стратегия предотвращения отказа);

ADR — средний доход от эксплуатации ветрогенератора в единицу времени.

14.4.3 Расширенная модель

В этой модели для оценки ожидаемого эффекта от применения системы контроля состояния используют данные о числе приоритета контроля, потерь от простоя оборудования, стоимости ремонтных работ и затрат на доставку запасных частей.

Число приоритета контроля $n_{MP, rel}$, полученное в результате FMECA (см. [10]), используется в сочетании с уменьшением чистых потерь за счет принятия предупредительных мер.

Число приоритета контроля $n_{MP, rel}$ включает в себя несколько показателей, характеризующих критичность узла, повторяемость признаков неисправности, сложность обнаружения вида отказа и его автоматического контроля, а также длину P-F-интервала. Контроль видов отказа с высоким числом приоритета предпочтительнее с точки зрения эффективности затрат, в то время как контроль видов отказа с малым значением числа приоритета контроля связан с неопределенностями в обнаружении соответствующих неисправностей, т. е. способен обеспечить меньшую годовую экономию.

Затраты, связанные с каждым видом отказа, включают в себя:

a) время простоя, выраженное в потерях дохода из-за недовыработки электрической энергии ветрогенератором;

b) затраты на ремонт, складывающиеся из стоимости запасных частей и стоимости труда;

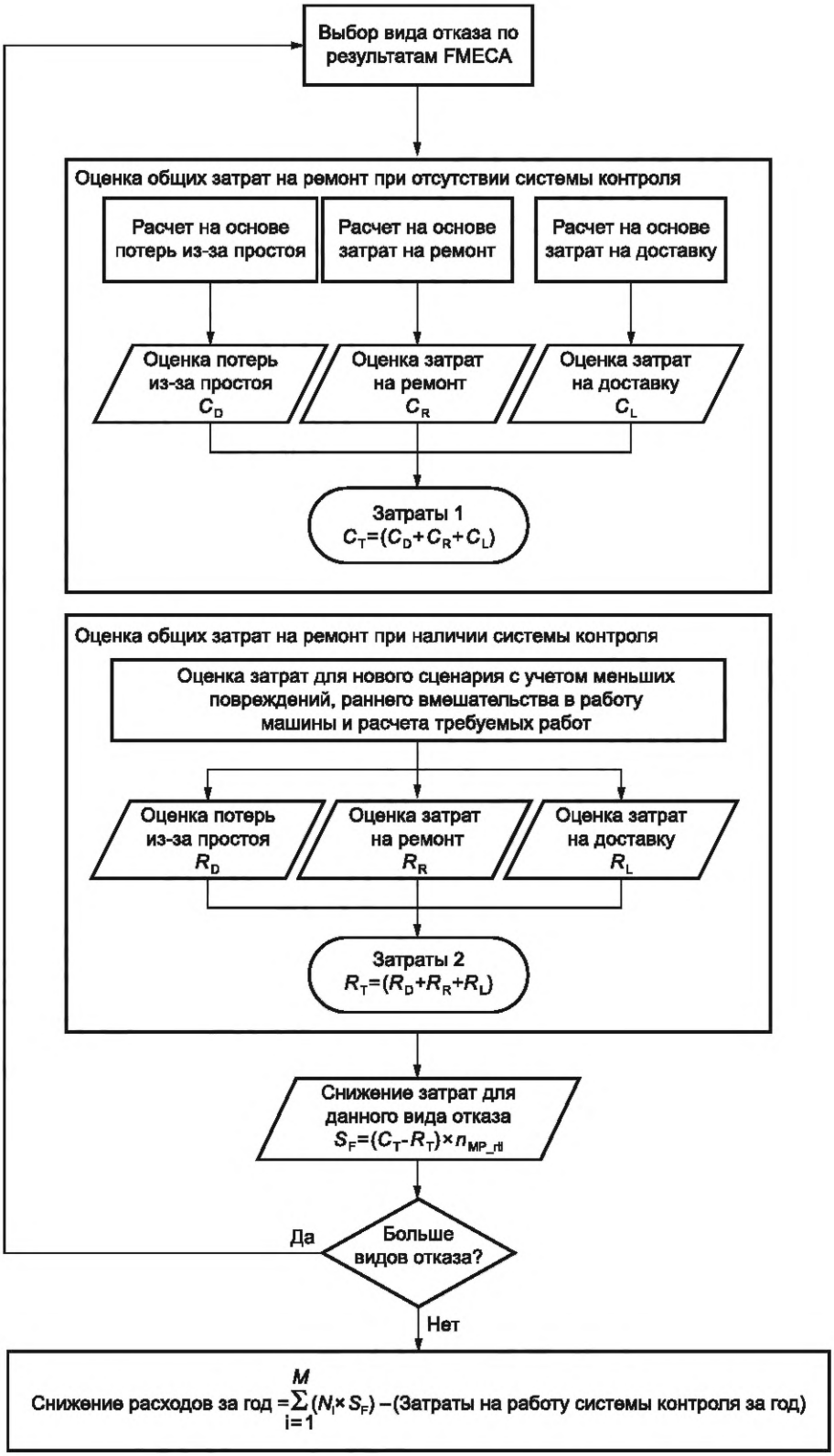
c) затраты на доставку запасных частей, работу подъемного крана, мобилизацию персонала и т.п. (для морских ветроэнергетических установок они особенно значительны).

Для анализа эффективности может быть применена технологическая карта, изображенная на рисунке 14, которая допускает внесение соответствующих модификаций.

Примечание 1 — Одной из трудностей, с которой сталкиваются операторы ветроэнергетических установок, является то, что потери от простоя установки будут максимальны в период сильных ветров, и в этот же период проведение ремонтных работ наиболее затруднено и продолжительно. Приведенная методология расчета не учитывает совокупное действие этих двух факторов, т.е. дает несколько заниженную оценку потерь. Например, опыт эксплуатации установок в Северном море показывает, что работы, запланированные на три дня вперед, дадут потерю одного рабочего дня из-за погодных условий.

Примечание 2 — Приведенный анализ затрат сделан с расчетом, что ремонтные работы выполнены с должным качеством. В противном случае неизбежны новые потери из-за повторных и вторичных отказов. Контроль состояния позволяет снизить эти потери, поскольку повторные отказы выявляются достаточно быстро. Это дает возможность внести необходимые поправки в технологию ремонта.

Большинство цифр, используемых в расчетах эффективности, основано на допущениях и наилучших оценках. Альтернативой может служить применение метода Монте-Карло в предположении, что показателям соответствуют не конкретные цифры, а диапазоны значений. Результатом процедуры будет вероятностная оценка эффективности.



N_i — i-й вид отказа (i — счетчик числа отказов); M — общее число отказов

Рисунок 14 — Технологическая карта расчета эффективности

Приложение А
(справочное)

Контролируемые параметры вибрации

А.1 Формирование параметров во временной области

В настоящем приложении рассматриваются параметры, полученные в результате цифровой фильтрации сигналов, но аналогичные тем, что ранее получали традиционными методами аналоговых преобразований.

Типичные преобразования: Временной сигнал подвергается фильтрации с использованием фильтров нижних частот, фильтров верхних частот, полосовых фильтров или фильтров огибающей сигнала. Фильтры могут быть следящими, т.е. с перестраиваемыми нижней и верхней границами в зависимости от изменения частоты вращения, или с фиксированной полосой пропускания. Выходной сигнал фильтра преобразуют в скалярную величину, такую как среднеквадратичное значение, пиковое значение, размах, пик-фактор или коэффициент эксцесса.

Применения: Параметры на основе сигнала вибрации используют для описания характера сигнала после очистки от неинформативных составляющих. Применительно к ветрогенераторам фильтр верхних частот может быть использован для исключения влияния раскачивания мачты ветроэнергетической установки, а фильтр нижних частот, наоборот, — для оценки собственных колебаний мачты. Временной сигнал может быть использован для формирования энергетического показателя всей вибрации в целом. Такой параметр используется для оценки вибрационного состояния ветрогенератора согласно [10].

Достоинства: Временной сигнал после частотной фильтрации может быть использован для определения энергии сигнала в полосе фильтрации. Это справедливо для сигналов любого вида: периодических, непериодических, импульсных и случайных. Энергетические характеристики могут быть получены в реальном масштабе времени, что удобно для оценки вибрационного состояния. Такой способ обработки позволяет добиться хорошего отношения сигнал/шум.

Недостатки: Данный способ обработки сигнала требует высоких вычислительных мощностей. Необходимо находить компромисс между требуемым диапазоном частот измерений и реальным спадом характеристики фильтра. Крутой спад характеристики предъявляет более высокие требования к вычислительным мощностям и допускает нестабильность получаемого параметра. Это означает, что данный вид фильтрации малопригоден в отношении параметров, связанных с вибрацией в очень узкой полосе частот.

Детекторы пикового значения, размаха, пик-фактора и коэффициента эксцесса: Параметры, полученные с применением указанных детекторов, следует использовать с осторожностью, поскольку все они чувствительны к пиковым значениям сигнала вибрации, которые могут носить случайный характер и не быть связанными с механическим дефектами. Как следствие, это может привести к изменчивости определяемого параметра и ложным оповещениям системы контроля. Особенно это справедливо для низкооборотной ступени ветрогенератора. Важно, чтобы перед формированием контролируемого параметра был использован полосовой фильтр, позволяющий отсечь неинформативные пики. Но даже при использовании такого фильтра следует выполнить детальный анализ сигнала, чтобы убедиться, что повышение уровня контролируемого параметра действительно связано с механической неисправностью.

А.2 Формирование параметров в узкой полосе частот спектра

А.2.1 Общие положения

Соответствующие параметры получают в результате использования дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Существуют несколько типов алгоритмов ДПФ, эквивалентные с точки зрения расчета одной линии в спектре. Каждая линия спектра описывается через значения амплитуды и фазы. Узкополосный фильтр может быть реализован в форме следящего фильтра, среднегеометрическая частота которого изменяется синхронно с изменением частоты вращения, или в форме фильтра с постоянными границами.

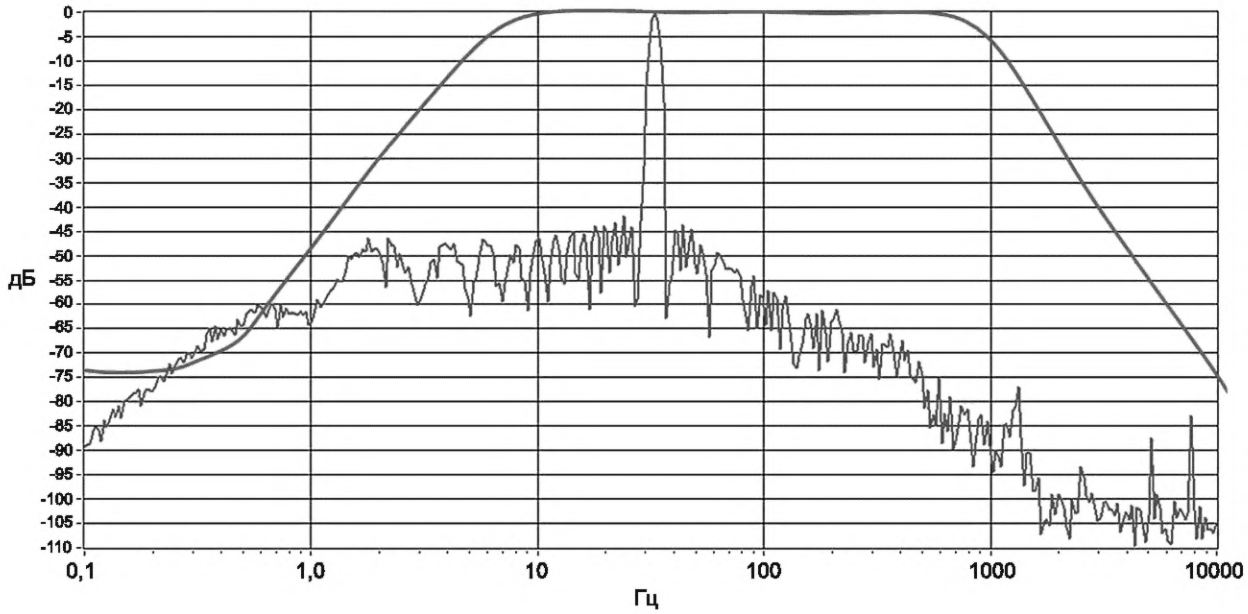
Применения: Данный алгоритм обработки хорошо подходит для измерений показателей, зависящих от частоты вращения, для определения дискретных составляющих спектра и для измерений векторов вибрации. Соответствующие параметры определяют по результатам FMSA, который дает информацию о дискретных частотах в спектре или комбинации таких частот, характерных для какой-либо неисправности. Поскольку частотная составляющая спектра описывается двумя величинами, амплитудой и фазой, необходимо выполнить преобразование для получения скалярного контролируемого параметра. В большинстве случаев рассматривают только значение амплитуды. Если же интерес представляет фаза сигнала, то ее рассматривают как отдельный параметр. При необходимости несколько частотных составляющих, являющихся типичными при развитии определенной неисправности, группируют, чтобы на их основе сформировать единый контролируемый параметр. Например, сгруппированы могут быть характерные частоты дефектов подшипника, гармонические составляющие и составляющие боковых полос, после чего сумма амплитуд всех сгруппированных частотных составляющих может рассматриваться как один контролируемый параметр. Такая процедура позволит сократить число контролируемых параметров.

Достоинства: Алгоритм быстр в реализации и не требует больших вычислительных мощностей. Позволяет проводить измерения как в реальном масштабе времени, так и после записи всего временного сигнала. Хорошо подходит в случае зависимости контролируемых параметров от частоты вращения турбины.

Недостатки: Метод ДПФ исходит из предположения о периодичности сигнала и плохо применим к сигналам с большим числом импульсов или переходным процессам. Метод не позволяет корректно оценить распределение энергии в сигнале, однако в случае относительных измерений это может быть не так важно.

Метод не позволяет измерить истинные пиковое значение и размах сигнала. Измерение истинного среднеквадратичного значения, требуемого многими стандартами по оценке вибрационного состояния, также невозможно. Расчет пикового значения или размаха с использованием множителей $\sqrt{2}$ или $2\sqrt{2}$ соответственно корректно только в случае чисто гармонического сигнала, который редко встречается на практике. Общего правила по оценке пиковых значений по измерениям в узкой полосе нет.

Требование периодичности сигнала обусловливает применение оконных функций (например, окна Хэмминга) к выборке перед процедурой ДПФ. Это влияет на результат анализа и в общем случае ухудшает отношение сигнал/шум по сравнению с методом временной фильтрации (см. рисунок А.1).

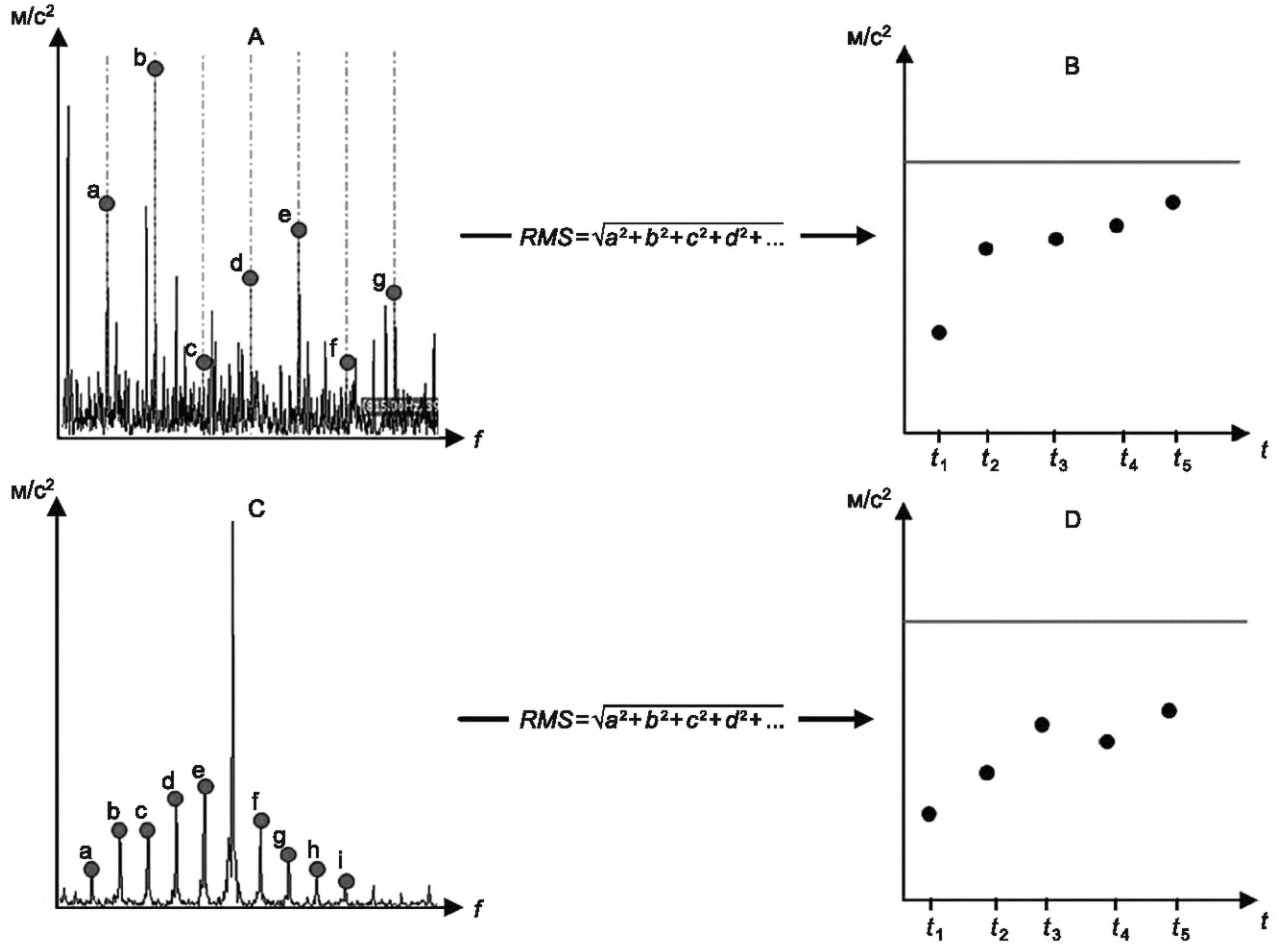


Примечание — Временной фильтр обеспечивает подавление сигнала за пределом полосы пропускания в 3000 раз, в то время как окно Хэмминга, примененное к выборке, — только в 100 раз. Применение других оконных функций (хэннинга, плосковершинного окна и т.п.) принципиально ситуацию не изменяет.

Рисунок А.1 — Сравнение соотношения сигнал/шум для фильтра во временной области (красная кривая) и ДПФ с использованием окна Хэмминга (синяя кривая)

А.2.2 Параметры, получаемые группировкой частотных составляющих

Контролируемые параметры получают на основе разложения сигнала на частотные составляющие (обычный спектр или спектр огибающей) методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) и использования либо какой-то одной составляющей спектра, либо группы составляющих. Энергия сигнала рассчитывается как сумма энергий отдельных спектральных составляющих (см. рисунок А.2), при этом необходимо внести поправку на оконную функцию, применяемую при БПФ-анализе.



A — спектр, на котором видно семейство гармоник; B — тренд квадратного корня из суммы квадратов гармоник в моменты времени t_1, t_2, t_3 и т.д.; C — частотные составляющие боковых полос; D — тренд квадратного корня из суммы квадратов составляющих боковых полос в моменты времени t_1, t_2, t_3 и т.д.

Рисунок А.2 — Пример группировки частотных составляющих спектра

Применения: Метод удобен для наблюдения за относительным изменением уровня вибрации на отдельных частотах, позволяет оценить распределение энергии вибрации для сигналов, описываемых комбинацией частотных составляющих. По изменению уровня гармоник или боковых полос удобно следить за развитием неисправности.

Достоинства: Алгоритм быстр в реализации и не требует больших вычислительных мощностей. Спектральные составляющие получаются автоматически при разложении в ряд Фурье. При необходимости несколько частотных составляющих, являющихся типичными при развитии определенной неисправности, группируют, чтобы на их основе сформировать единый контролируемый параметр. Например, сгруппированы могут быть характерные частоты дефектов подшипника, гармонические составляющие или составляющие боковых полос, свидетельствующие о неисправности в зубчатой передаче.

Недостатки: Преобразование Фурье применяют к периодическим сигналам. В случае непериодических сигналов полученный вид спектра неточно отражает распределение энергии вибрации по областям частот. Измерение истинного среднеквадратичного значения, как того требует, например, [10], невозможно. Однако метод может быть использован там, где необходимо отслеживать относительные изменения во времени.

А.3 Преобразования во временной области перед вычислением спектра

А.3.1 Общие положения

Предварительная обработка во временной области может быть использована с целью компенсации изменений частоты вращения турбины, а также для улучшения отношения сигнал/шум перед последующим анализом в частотной области.

А.3.2 Передискретизация временного сигнала

Обычные методы оцифровки сигнала с преобразователя вибрации используют выборку с постоянной частотой (или периодом) дискретизации. Полученную выборку затем подвергают БПФ. Такой метод неудобен при непостоянной частоте вращения вала машины, поскольку в этом случае гармоники частоты вращения меняют свое положение в спектре сигнала, а разным оборотам вала машины соответствуют разное число отсчетов в выборке. Результатом является уширение линий в спектре сигнала (см. рисунок А.3).

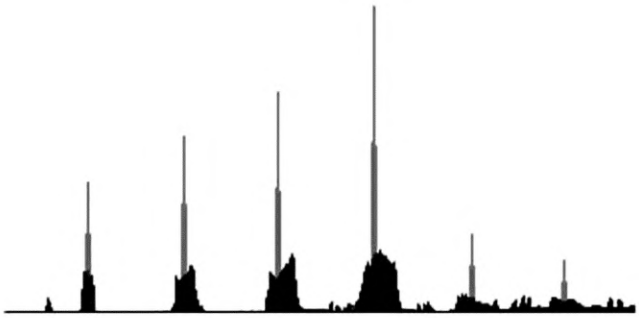
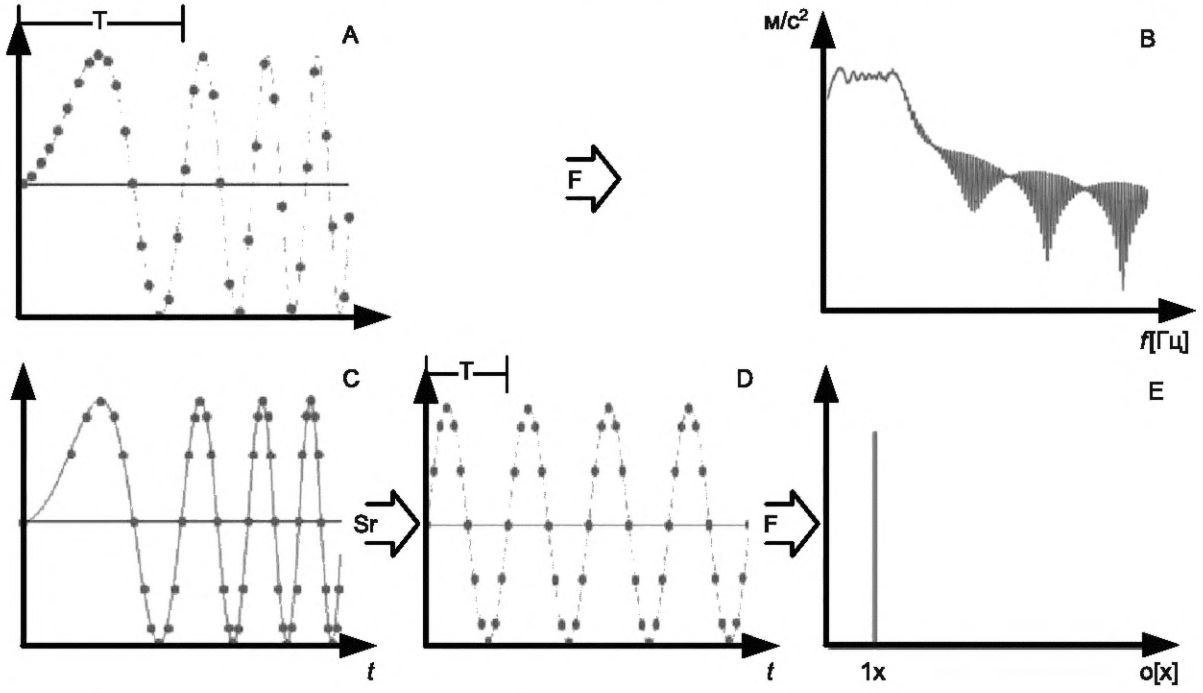


Рисунок А.3 — Соотношение исходных частотных составляющих (показаны черным цветом) и гармоник порядкового анализа (показаны красным цветом)

Передискретизация сигнала, осуществляемая с целью привязать временные отсчеты к углу поворота вала, устраняет эффект уширения спектральных линий. При этом одному обороту вала всегда будет соответствовать одно и то же число отсчетов сигнала вибрации. В этом случае спектральные линии, полученные преобразованием Фурье, будут оставаться на одном месте в спектре даже при изменениях частоты вращения. Для выполнения процедуры передискретизации необходим сигнал с датчика частоты вращения вала (тахометра), обеспечивающий синхронизацию процесса выборки (дискретизации) сигнала с оборотом вала (см. рисунок А.4).



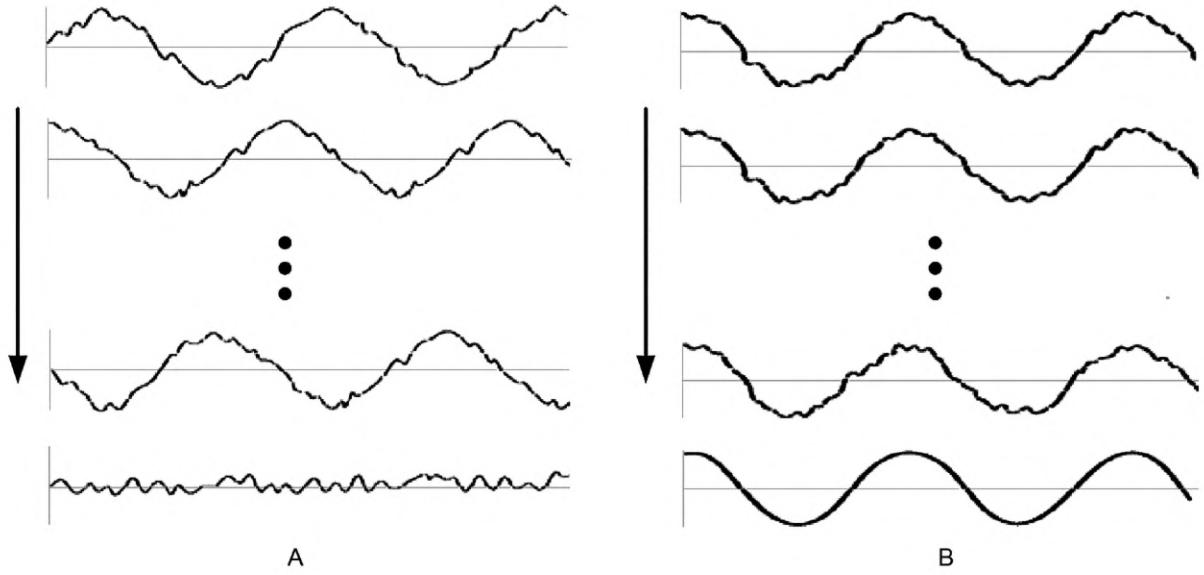
T — один оборот вала; A — выборка из сигнала вибрации с постоянной частотой дискретизации при изменении скорости вращения вала (например, в процессе пуска); B — анализ в частотной области исходной выборки A (размазывание спектральной составляющей); C — передискретизация временного сигнала (равное число отсчетов за один оборот вала); D — выборка в области изменения угла оборота вала; E — единственная частотная составляющая порядкового анализа

Рисунок А.4 — Передискретизация временного сигнала

Зная отношение частот вращения валов в коробке передач, можно процедуру передискретизации расширить таким образом, чтобы выборка, изначально привязанная к оборотам одного вала, стала привязана к оборотам другого вала. Это облегчит формирование диагностических признаков, связанных с частотами вращения разных валов.

А.3.3 Временное усреднение

Усреднение сигнала вибрации во временной области перед проведением дальнейшего анализа позволяет улучшить соотношение сигнал/шум за счет удаления составляющих, не синхронных с частотой вращения вала. Для этого необходимо, чтобы операция усреднения была синхронизирована с вращением вала. При изменяющейся частоте вращения турбины операции усреднения должна предшествовать процедура передискретизации (см. рисунок А.5).



A — простое усреднение (по мере роста числа усредняемых сигналов результирующий сигнал стремится к нулю из-за случайной начальной фазы сигналов); B — синхронное усреднение (одна и та же начальная фаза усредняемых сигналов)

Рисунок А.5 — Простое и синхронное усреднения

А.4 Другие методы преобразования сигнала вибрации

А.4.1 Общие положения

Формирование контролируемых параметров с использованием других методов анализа может быть осуществлено не в реальном масштабе времени после формирования временных выборок. Распространенными видами преобразования сигнала являются демодуляция сигнала для выделения его огибающей и кепстральный анализ. Вообще число возможных методов преобразований сигнала ограничено только общим требованием, чтобы информация о неисправностях, содержащаяся в сигнале, была сжата до одной скалярной величины (контролируемого параметра), по которой можно наблюдать за изменением состояния узла машины.

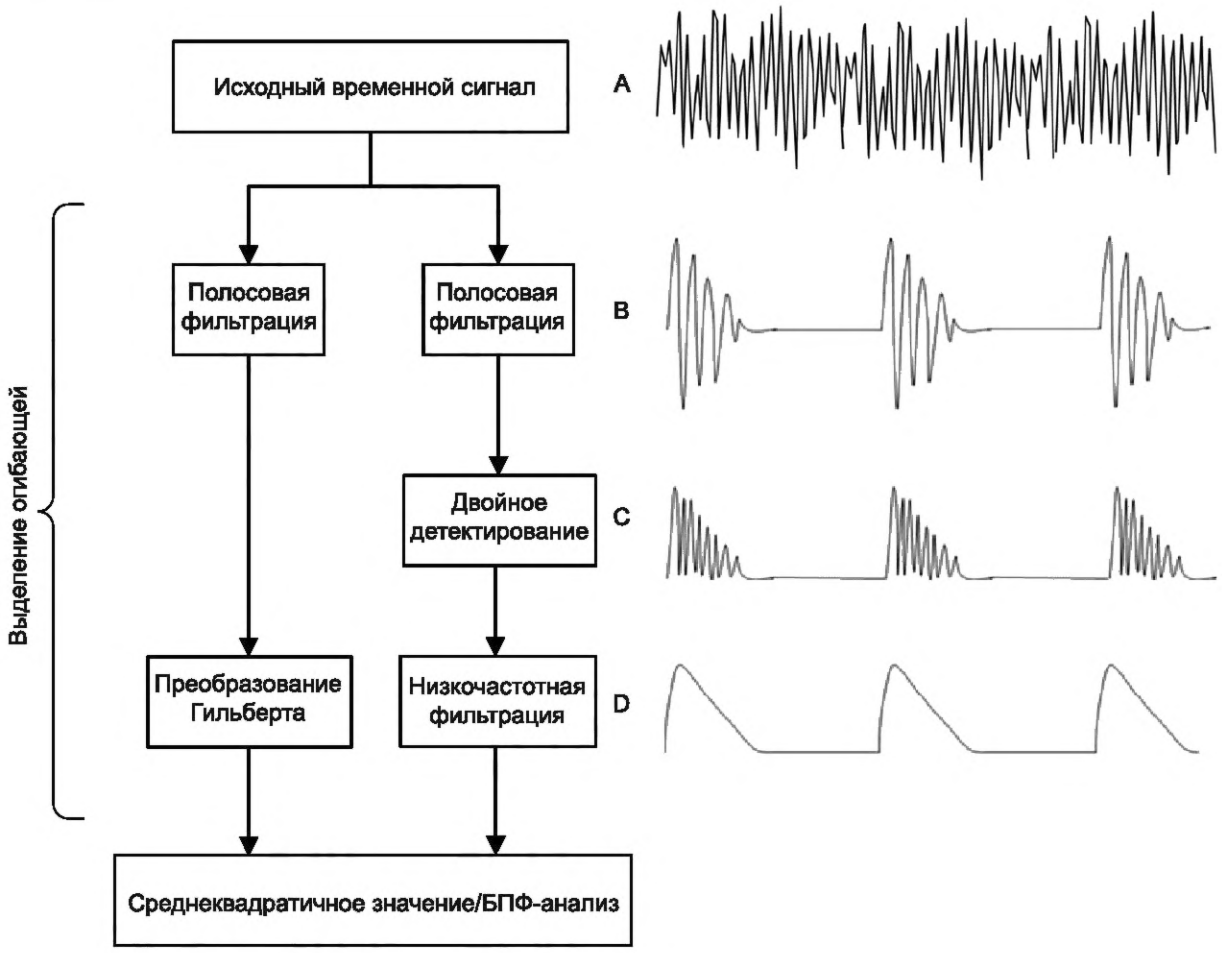
А.4.2 Демодуляция сигнала

Данный метод применяют для преобразования сигнала вибрации, источником которого являются ударные процессы из-за дефектов поверхностей подшипников или зубьев в зубчатых передачах. Такие процессы характеризуются высокочастотными составляющими, которые накладываются на низкочастотный сигнал вибрации. Вначале выделяют высокочастотные составляющие из их смеси с низкочастотным сигналом посредством полосовой фильтрации, после чего находят огибающую высокочастотного сигнала. Сигнал огибающей исследуют обычными методами частотного анализа для определения составляющих на характерных подшипниковых или зубцовых частотах или для вычисления среднеквадратичного значения, характеризующего общую энергию ударного процесса, вызванного неисправностью.

Применяют следующие способы выделения огибающей:

- **детектирование огибающей.** Это традиционный способ фильтрации, в котором в после полосовой фильтрации в высокочастотной области и детектирования информативную низкочастотную составляющую получают с помощью фильтра нижних частот. Двухполупериодное детектирование повышает качество выделения огибающей. Важной частью процедуры детектирования огибающей является правильный выбор полосового фильтра для выделения высокочастотного сигнала, несущего информацию о возможной неисправности;

- **преобразование Гильберта.** В данном методе огибающая сигнала выделяется преобразованием исходного сигнала и его квадратурной составляющей. Как и в методе детектирования огибающей важно определить диапазон частот, несущей полезную информацию о неисправности, и выбрать соответствующий полосовой фильтр (см. рисунок А.6).



A — исходный сигнал вибрации; B — сигнал после полосовой фильтрации (видны ударные импульсы); C — двухполупериодное выпрямление сигнала (детектирование); D — выделенная огибающая сигнала

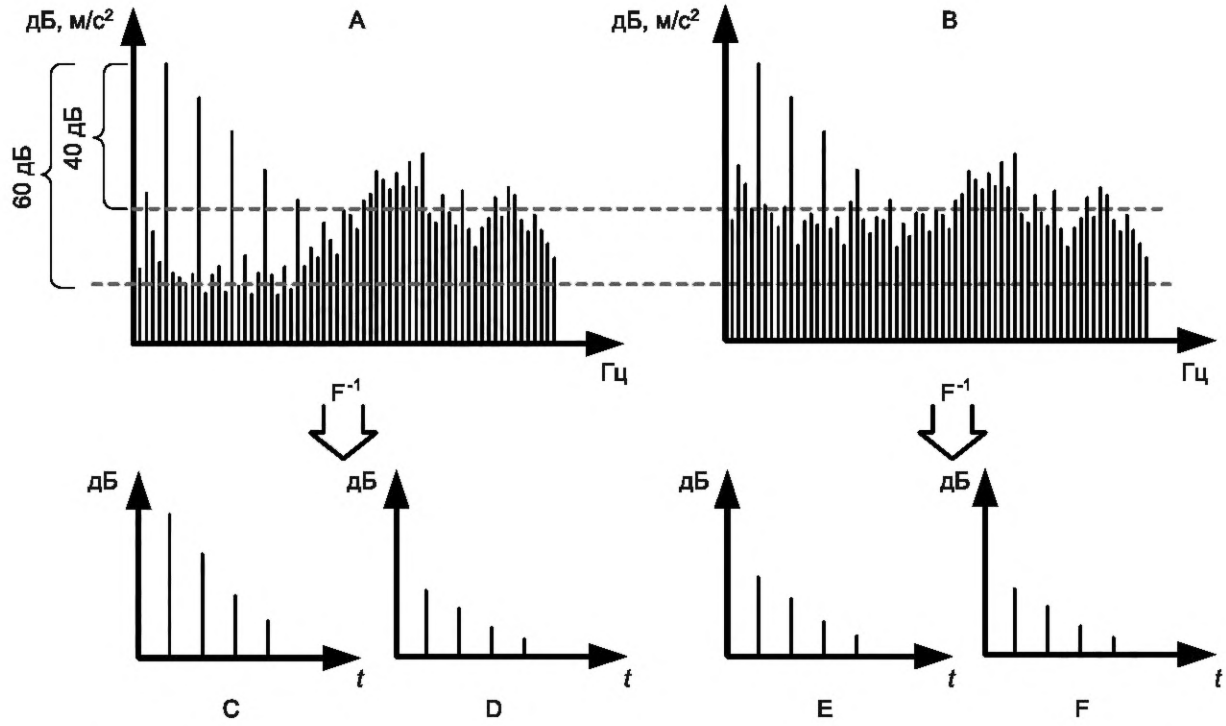
Рисунок А.6 — Два способа выделения огибающей высокочастотного сигнала

А.4.3 Кепстральный анализ

Кепстр подчеркивает ряды гармоник или боковых частот в спектре вибрационного сигнала. По сути он является «спектром от логарифма спектра» или, выражаясь более корректно, обратным преобразованием Фурье логарифма от прямого преобразования Фурье. Название «кепстр» является анаграммой слова «спектр», а названия его характеристик — анаграммами соответствующих характеристик спектра:

- сачтота (вместо частоты),
- рагмоника (вместо гармоники).

Подобно тому, как обычный спектральный анализ является наилучшим средством выявления периодичности в сигнале, кепстральный анализ служит для выявления периодичности в спектре сигнала, т.е. рядов гармоник или боковых частот. Однако чтобы обеспечить сопоставимость кепстров, служащих для выделения одних и тех же гармонических рядов, предварительно в спектре сигнала следует убрать шумовой пьедестал. Данный эффект иллюстрируется рисунком А.7. Видно, что на рисунках А.7 C и E, где шум не был исключен, амплитуды соответствующих рагмоник различны. После исключения шума (рисунки А.7 D и F) они становятся одинаковыми.



A — спектр сигнала с низким уровнем шума; B — спектр сигнала с высоким уровнем шума; C — кепстр сигнала A с отсечкой пьедестала на уровне 60 дБ; D — кепстр сигнала A с отсечкой пьедестала на уровне 40 дБ; E — кепстр сигнала B с отсечкой пьедестала на уровне 60 дБ; F — кепстр сигнала B с отсечкой пьедестала на уровне 40 дБ

Рисунок А.7 — Кепстральный анализ

А.5 Продолжительность измерений контролируемых параметров

Характеристикой, определяющей необходимое время измерения сигнала вибрации, является произведение ширины спектра B на длину реализации T_s. Для единственной спектральной линии, полученной с применением полосового фильтра минимальной ширины, $BT_s = 1$. Однако на практике при измерениях контролируемых параметров данное значение BT_s будет слишком мало. Значение этой характеристики следует выбирать таким образом, чтобы подавить случайные составляющие сигнала. Это можно сделать либо за счет увеличения B, либо за счет увеличения T_s, либо за счет увеличения обоих этих параметров. Для выбора продолжительности измерения сигнала используют формулу

$$BT_s = C, \tag{A.1}$$

где B — ширина полосы фильтра;

T_s — длина реализации;

C — константа, значение которой зависит от вида сигнала.

Рекомендуется выбирать значение C в диапазоне от 5 до 10 для периодического сигнала и приблизительно 100 для случайного сигнала. Если результирующий спектр получают усреднением спектров, рассчитанным для разных временных выборок, то $C = 1$. При этом число выборок должно быть от 10 до 30 в зависимости от вида сигнала (чем более случайный характер сигнала, тем больше должно быть значение C).

Приложение В
(справочное)

FMSA для трансмиссии ветрогенератора

В настоящем приложении рассматриваемая процедура FMSA основана на результатах FMECA, выполненного в соответствии с [10] и установившего набор контролируемых параметров для трансмиссии ветрогенератора. Наименования контролируемых параметров даны в соответствии с [14]. Указанную процедуру следует рассматривать только как пример реализации положений раздела 5. Этот пример основан в большей части на измерении параметров вибрации, что не исключает возможность использования параметров другого типа. Результаты процедуры FMSA сведены в таблицу В.1.

Таблица В.1 — Пример применения FMSA для узлов трансмиссии ветрогенератора

Узел	Подшипники электрогенератора			GnDe, GnNDe
Вид отказа	Дефект подшипника качения			
Причина отказа	Повреждение дорожек или корпуса подшипника			
Число приоритета n_{MP}	0,67			
Диагностические признаки	Развивающийся тренд Рост высокочастотных составляющих Повышение уровня вибрации составляющих, несинхронных с частотой вращения вала Общий уровень вибрации (среднеквадратичное значение)			
Контролируемые параметры	GnDe.BP[1k-10k]	Ускорение	Радиальное	Высокочастотная полосовая фильтрация (раннее обнаружение)
	GnDe.ENV [1k-10k,5Hz-300Hz]	Ускорение	Радиальное	Демодуляция полосового сигнала (раннее обнаружение)
	GnDe.ISOA-21 [10Hz-1k]	Ускорение	Радиальное	По ИСО 10816-21 (развитое повреждение)
	BPFO	Ускорение	Радиальное	Частота перекатывания тел качения по наружному кольцу
	BPFI	Ускорение	Радиальное	Частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу
	BSF	Ускорение	Радиальное	Частота вращения тел качения
	FTF	Ускорение	Радиальное	Частота вращения сепаратора
Первичный метод контроля	Долговременный тренд контролируемых параметров			
Межконтрольный интервал	1 ч			
Характеристика для адаптации к условиям работы	Активная мощность			PwrAct
Вид отказа	Неисправность системы смазки			
Причина отказа	Отсутствие смазки			
Число приоритета n_{MP}	0,54			
Диагностические признаки	Развивающийся тренд Рост температуры Повышение уровня шума подшипников			

Окончание таблицы В.1

Узел	Подшипники электрогенератора			GnDe, GnNDe
Контролируемые параметры	GnBrgTmp	Температура	—	Температура подшипников
	CarpetLevel	Ускорение	Радиальное	Уровень шума в подшипниковой полосе частот
Первичный метод контроля	Долговременный тренд контролируемых параметров			
Межконтрольный интервал	1 мин (на последней стадии при работе подшипников «всухую»)			
Характеристика для адаптации к условиям работы	Активная мощность			PwrAct
Вид отказа	Несоосность подшипника			
Причина отказа	Сильная несоосность внешнего кольца из-за ненадлежащих нагрузок			
Число приоритета n_{MP}	0,67			
Диагностические признаки	Повышение 1-й, 2-й и высших гармоник частоты вращения. Могут изменяться с нагрузкой			
Контролируемые параметры	1 МА	Ускорение/ скорость	Радиальное	1-я гармоника частоты вращения
	2 МА	Ускорение/ скорость	Радиальное	2-я гармоника частоты вращения
	Harm[2 МА,6 МА]	Ускорение	Радиальное	Высшие гармоники частоты вращения
Первичный метод контроля	Долговременный тренд контролируемых параметров			
Межконтрольный интервал	1 ч			
Характеристика для адаптации к условиям работы	Активная мощность			PwrAct
Вид отказа	Ослабление посадки подшипника			
Причина отказа	Неправильная посадка, приведшая к увеличенным зазорам между частями подшипника			
Число приоритета n_{MP}	0,67			
Диагностические признаки	Рост гармоник частоты вращения. Могут появляться составляющие на частотах, некратных частоте вращения			
Контролируемые параметры	Harm[2 МА,6 МА]	Ускорение	Радиальное	Высшие гармоники частоты вращения
	Harm[1,5 МА,6,5 МА]	Ускорение	Радиальное	Гармоники, некратные частоте вращения
Первичный метод контроля	Долговременный тренд контролируемых параметров			
Межконтрольный интервал	1 ч			
Характеристика для адаптации к условиям работы	Активная мощность			PwrAct

Аналогичный анализ должен быть выполнен для всех видов отказов всех узлов трансмиссии ветрогенератора.

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, межгосударственного стандарта
ISO 2041	IDT	ГОСТ Р ИСО 2041—2012 «Вибрация, удар и контроль технического состояния. Термины и определения»
ISO 13372:2012	IDT	ГОСТ Р ИСО 13372—2013 «Контроль состояния и диагностика машин. Термины и определения»

Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты.

Библиография

[1] ISO 4406 Hydraulic fluid power — Fluids —Method for coding the level of contamination by solid particles

[2] ISO 5348 Mechanical vibration and shock — Mechanical mounting of accelerometers

[3] ISO 10816-21 Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 21: Horizontal axis wind turbines with gearbox

[4] ISO 10817-1 Rotating shaft vibration measuring systems — Part 1: Relative and absolute sensing of radial vibration

[5] ISO 13373-1 Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 1: General procedures

[6] ISO 13373-2 Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data

[7] ISO 13373-3 Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 3: Guidelines for vibration diagnosis

[8] ISO 13379-1 Condition monitoring and diagnostics of machines — Data interpretation and diagnostics techniques — Part 1: General guidelines

[9] ISO 13381-1 Condition monitoring and diagnostics of machines — Prognostics — Part 1: General guidelines

[10] ISO 16079-1 Condition monitoring and diagnostics of wind turbines — Part 1: General guidelines

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

[12] ISO 18436 (all parts) Condition monitoring and diagnostics of machines — Requirements for certification of personnel

[13] ISO 29821-1:2011 Condition monitoring and diagnostics of machines — Ultrasound — Part 1: General guidelines

[14] IEC 61400-25-6 Wind turbines — Part 25-6: Communications for monitoring and control of wind power plants — Logical node classes for condition monitoring

[15] IEC 62541 OPC unified architecture

[16] DNV-GL — Guideline — Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines

[17] VDI 3832, Measurement of structure-borne sound of rolling element bearings in machines and plants for evaluation of state condition

[18] ANSI/AGMA 6000-B96 (R2002) Specification for Measurement of Linear Vibration on Gear Units. American Gear Manufacturers Association / 01-Jan-1996 / 21 pages. ISBN: 1555896669

[19] Brüel & Kjær Piezoelectric Accelerometers and Vibration Amplifiers. Theory an Application Handbook. Available on the internet

[20] Gellermann Th., Oertel U., Fritsch H., «Use of VDI3834-1 & DIN ISO 10816-21 for vibration monitoring of large wind turbine fleets», VGB Powertech 7-2017/ pages 48-52, July 2017

[21] J. Wesley HINES, Alexander Usynin. Current Computational Trends in Equipment Prognostics — J. Wesley HINES, Alexander Usynin Nuclear Engineering Department, University of Tennessee, Knoxville, TN 38996, USA

[22] Khan M.A., Starr A. G., Wear debris «Basic features and machine health diagnostics», Through Life Support Research Group, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering

[23] Heng Aiwina, Zhang Sheng, C.C.Tan Andy, Mathew Joseph, «Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities», CRC for Integrated Engineering Asset Management, Faculty of Built Environment & Engineering, Queensland University of Technology Mechanical Systems and Signal Processing 23 (2009) 724—739

[24] Robert Bond Randall — Vibration-based condition monitoring. Industrial, aerospace and automotive applications. School of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of New South Wales, Australia. A John Wiley and Sons, Ltd., Publication

[25] Paper W., Emerson December 2017 «High Frequency Vibration Analysis»

УДК 534.322.3.08:006.354 ОКС 27.180

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, ветрогенераторы, система контроля состояния, FMECA

Редактор *В.Н. Шмельков*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *Е.А. Кондрашовой*

Сдано в набор 02.12.2021. Подписано в печать 11.01.2022. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 4,60.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

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

gost.e-ecolog.ru