

Руководство для инженеров

Техническое обслуживание, которое имеет значение



Оптимизация показателей эксплуатационной готовности установки на основе:

- лазерной центровки валов;
- анализа вибрации;
- динамической балансировки;
- анализа продуктов износа.

Руководство для инженеров

по центровке валов, анализу вибрации,
динамической балансировке и анализу продуктов
износа

Док. №: ALI 9.600.RU

Издание: 12

Выпущен: 10.2017



Авторское право

Настоящая публикация и продукты, описанные в данном руководстве, защищены авторским правом. Авторы сохраняют за собой все права. Запрещаются копирование, воспроизведение, перевод или предоставление данной публикации третьим лицам в любой другой форме — частично или полностью — без предварительного одобрения.

Отказ от ответственности

Авторы подготовили данную публикацию со всей тщательностью. Она не предназначена для использования в качестве исчерпывающего руководства по центровке, анализу или балансировке технологического оборудования, а также в качестве альтернативы профессиональным консультациям или рекомендациям производителей оборудования. PRUFTECHNIK AG или ее дочерние компании не принимают на себя ответственность за действия, предпринятые на основе информации, содержащейся в настоящей публикации. PRUFTECHNIK AG и/или ее дочерние компании не несут прямой или косвенной ответственности за любые претензии третьих сторон, возникшие в результате использования или применения информации, содержащейся в этом руководстве.

Товарный знак

Товарные знаки и зарегистрированные товарные знаки, указанные в этих инструкциях, обычно обозначаются в качестве таковых и являются собственностью их владельцев. Однако отсутствие маркировки не означает, что эти названия не защищены.

Введение	8
----------------	---

Центровка валов..... 9

Что такое центровка валов?.....	10
---------------------------------	----

Представление центровки 13

Параметры центровки	13
---------------------------	----

Насколько точной должна быть центровка?..... 21

Допуски центровки для упругих муфт.....	21
---	----

Поиск и устранение неисправностей..... 25

Механическое напряжение муфты и прогиб вала.....	25
--	----

Причины разрушения машины.....	27
--------------------------------	----

Суммарные преимущества точной центровки валов	29
---	----

Признаки расцентровки	29
-----------------------------	----

Методы и практика центровки 31

Методы центровки — визуальный метод.....	37
--	----

Методы центровки — циферблатные индикаторы	39
--	----

Методы центровки — лазерная центровка валов.....	51
--	----

Практические примеры	58
----------------------------	----

Системы лазерной центровки PRUFTECHNIK	66
--	----

Тепловое расширение машин..... 67

Системы мониторинга центровки PRUFTECHNIK	70
---	----

Центровка шкивов..... 71

Центровка шкива.....	74
----------------------	----

Система центровки ременного шкива PRUFTECHNIK	78
---	----

Анализ вибрации	83
Мониторинг состояния.....	84
Анализ вибрации.....	89
Основные параметры.....	89
Преобразователи	97
Место установки.....	97
Конструкция преобразователей.....	98
Обнаружение неисправностей	102
Основная теория огибающей.....	109
Подход на основе здравого смысла	113
Анализ FFT	115
Подшипники качения	122
Оценка ударного импульса.....	128
Неисправности шестерни и редуктора	133
Анализ неисправности ослабления	136
Ремни и шкивы	139
Вентиляторы	141
Электродвигатели	143
Другие электромеханические неисправности.....	145
Изогнутый ротор или вал	148
Фаза	149
Устройства сбора данных и анализаторы вибраций компании PRUFTECHNIK 152	

Динамическая балансировка 153

Стандарты балансировки 154

Методы коррекции 158

Балансировка в одной плоскости 160

Метод стробоскопа в двух плоскостях (разработан А. Вархайтом) 169

Расчет пробного веса 173

Безопасность при выполнении балансировки 174

Устройства балансировки компании PRUFTECHNIK 175

Анализ продуктов износа 177

Обзор 178

Обзор методов WDA 179

Оценка результатов анализа WDA 182

Процедура взятия проб и место отбора проб 184

Система WDA компании PRUFTECHNIK 185

Ресурсы 189

О компании PRUFTECHNIK 190

Дополнительные материалы 191

Введение

Данное руководство предназначено для предоставления базовой информации и рекомендаций по внедрению эффективной центровки валов, анализа вибрации и динамической балансировки для стандартных систем вращающихся машин.

Лазерная центровка, динамическая балансировка и мониторинг состояния являются важными компонентами эффективной стратегии обслуживания вращающихся машин. Каждая стратегия по отдельности помогает уменьшить вероятность неожиданного отказа машины. В совокупности они составляют основу стратегии активного технического обслуживания, которая позволяет не только выявить начальную стадию неисправностей, но и значительно продлить срок службы машины.

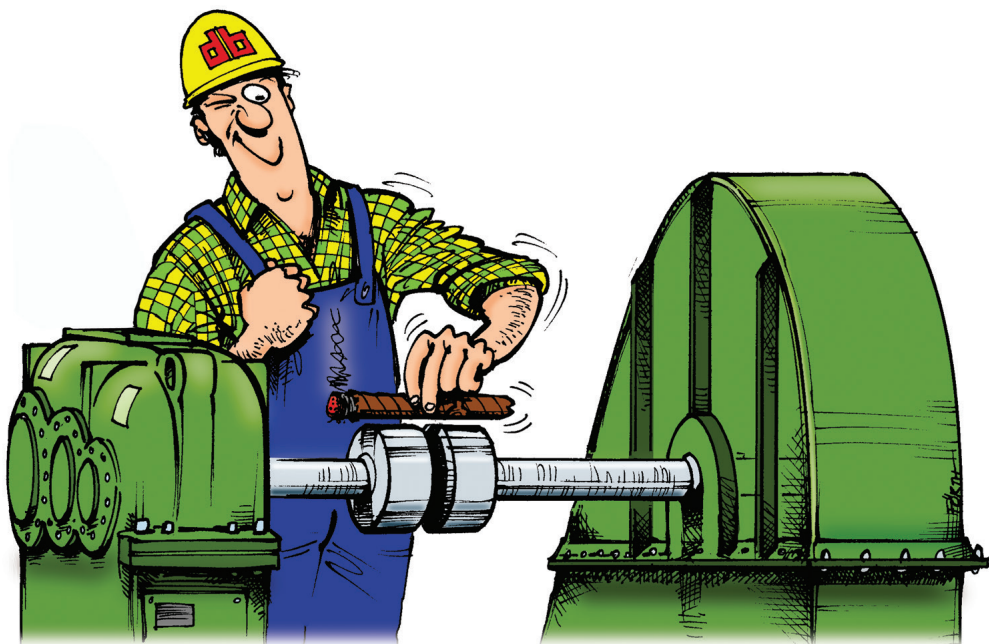
В каждом разделе этого руководства мы использовали один или два примера доступных методов для измерения требуемых параметров. Мы не предлагаем считать, что методы, проиллюстрированные примерами, являются единственно возможными. Все те, кто хочет продолжить изучение рассмотренных здесь вопросов, могут найти библиографию некоторой доступной литературы в конце данного руководства.

Компания PRUFTECHNIK объединяет специалистов по центровке и мониторингу вращающихся машин. За 40 лет нашего существования мы накопили значительный объем практических знаний в этой области. При этом мы выпустили большое число руководств, посвященных отдельным темам и системам. Настоящее руководство является квинтэссенцией этих накопленных знаний. В каждом разделе представлен краткий обзор последних систем PRUFTECHNIK, предназначенных для использования в конкретных областях применения.

Мы надеемся, что эта информация представлена в понятной для чтения форме и что она сможет стать основой для успешного использования экономически эффективных практических способов техобслуживания установок новичкам в этой области.

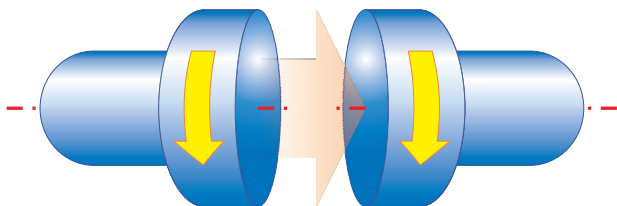
Раздел 1

Центровка валов



Что такое центровка валов?

Центровка валов представляет собой процесс, при котором две или более машины (как правило, двигатель и насос) расположены таким образом, что в нормальном режиме работы машин оси вращения обоих валов в точке передачи мощности от одного вала к другому являются коллинеарными.



Как и во всех стандартных определениях, здесь есть свои исключения. Некоторые типы соединений, например зубчатые муфты или карданные валы, требуют определенной расцентровки для обеспечения правильной смазки во время работы. Обратите внимание на следующие важные моменты в приведенном выше определении.

В момент передачи мощности

Все валы имеют некоторую форму провиса, обусловленную собственным весом вала, следовательно, они не являются прямыми. Поэтому место, где можно сравнить центровку двух валов, находится только в точке передачи мощности от одного вала к другому.

Оси вращения

Не путайте «центровку вала» с «центровкой муфты». Поверхности муфты не должны использоваться для измерения состояния центровки, поскольку они не представляют собой ось вращения валов. Чтобы сэкономить затраты на производство, поверхности муфт зачастую подвергаются грубой механической обработке или в некоторых случаях не обрабатываются вообще.

Точность посадки муфты на валу неизвестна

Вращение только одного вала и использование циферблатных индикаторов для измерения противоположной поверхности муфты не определяет ось вращения обоих валов.

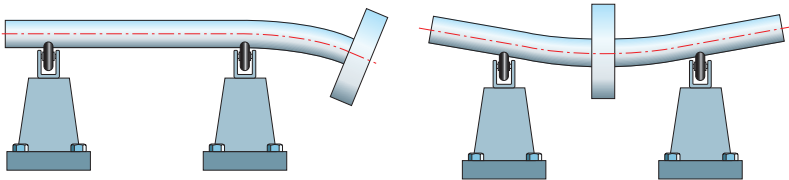
При нормальных условиях работы

Состояние центровки в процессе работы машин может измениться. Такое изменение может возникать по ряду причин, включая тепловое расширение, деформацию трубопроводов, крутящий момент машины, перемещение фундамента и люфт подшипника. Поскольку состояние центровки валов обычно измеряется на холодных машинах, измеренное состояние центровки не обязательно является нулевым состоянием центровки машин.

Состояние центровки должно быть измерено во время вращения валов в нормальном направлении. На корпусах большинства насосов, вентиляторов и двигателей и т. д. нанесены стрелки, показывающие направление вращения.

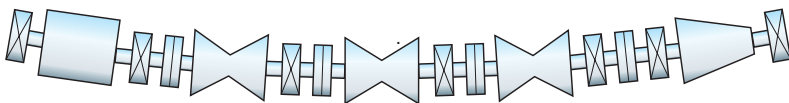
Провис машины

Величина прогиба вала машины зависит от нескольких факторов, таких как жесткость валов, вес концов вала за опорами, конструкция подшипника и расстояние между опорами.



Естественный изгиб валов под собственным весом

Для подавляющего большинства вращающихся машин с глухим соединением валов такой провис пренебрежимо мал, и поэтому для практических целей его можно игнорировать. На валопроводах с длинными приводами, например на турбогенераторах электростанций, или на машинах с длинными промежуточными валами, например на вентиляторах градирен или газовых турбинах, кривую провиса необходимо учитывать.

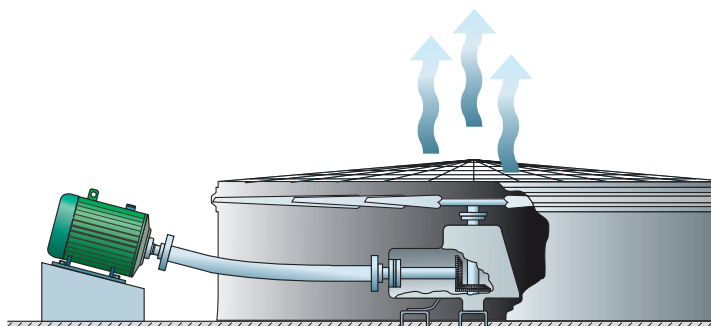


Провис машины

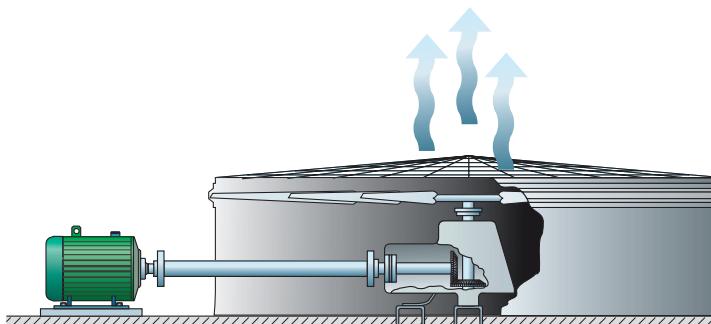
Для примера, в паровой турбине центровка валов относительно друг друга не менее $1/100$ мм, однако средняя точка центрального вала может находиться на 30 мм ниже двух концевых валов.

Работа на оборотах выше критических?

Когда очень длинный гибкий вал начинает вращаться, провис вала имеет тенденцию устраняться, однако он никогда полностью не устранится. Важно понимать, что ось вращения вала может с большой вероятностью представлять собой криволинейную ось. В ситуациях, когда две или более единицы оборудования соединены между собой одним или несколькими валами, вращающимися вокруг оси вращения с провисом, важно выровнять валы так, чтобы они обеспечивали изогнутую центральную линию вращения.



Работа приводного вала на оборотах ниже критической
Центровка муфт машины с распорными муфтами

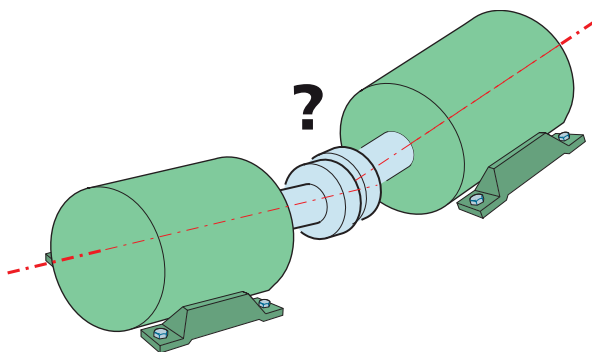


Работа приводного вала на оборотах выше критической
Совместите муфты машины друг с другом, игнорируя распорную муфту

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЦЕНТРОВКИ

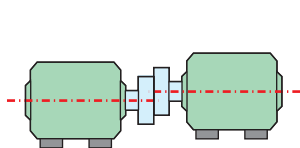
Параметры центровки

Поскольку центровку валов необходимо измерять и впоследствии корректировать, необходимо найти способ количественного определения и описания состояния центровки.

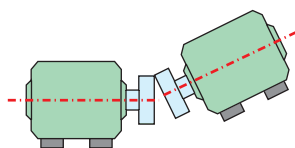


Как правило, центровку описывают в терминах показаний циферблатных индикаторов на торцах муфты или значений положения на опорах машины. Результаты измерений, полученные при использовании обоих этих методов, зависят от размеров машин. Учитывая то, что существует множество различных методов для установки циферблатных индикаторов (например, метод обратных индикаторов, на ободу и торце, на двух ободьях), сравнение результатов измерений и применение допусков может оказаться проблематичным. Кроме того, показания индикатора на ободу показывают значение, вдвое превышающее истинное смещение, и в зависимости от того, что измеряет индикатор: внутреннюю или внешнюю, левую или правую поверхность муфты или обода, — следует учитывать изменения знака.

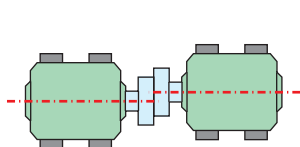
Более современный и понятный подход заключается в описании состояния центровки машины с точки зрения **угла перегиба** и **смещения** в горизонтальной (вид сверху) и вертикальной (вид сбоку) плоскости. Четыре значения, полученные при использовании этого метода, в дальнейшем можно использовать для представления состояния центровки, как показано на следующей схеме.



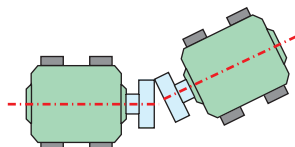
Вертикальное смещение



Вертикальный угол перекоса



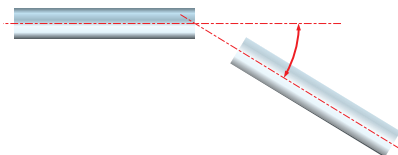
Горизонтальное смещение



Горизонтальный угол перекоса

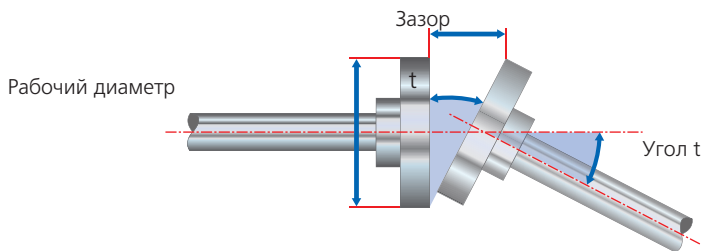
Угол перекоса, зазор и смещение

Угол перекоса представляет собой угол между двумя вращающимися осями.



Угол перекоса может быть выражен непосредственно в виде угла в градусах или мрадах или в единицах измерения наклона в мм/м или тыс/дюйм. Этот последний метод весьма полезен, поскольку угол перекоса, умноженный на диаметр муфты, дает эквивалентную разность зазора на ободу муфты.

Таким образом, угол получает более широкое представление в виде значения зазора относительно диаметра. Сам зазор не имеет смысла; чтобы придать ему значение, зазор нужно разделить на диаметр. Диаметр следует называть «рабочим диаметром», однако его часто называют диаметром муфты. В качестве рабочего диаметра можно использовать любое удобное значение. Он представляет собой соотношение зазора и диаметра.



Отношение угла, зазора и рабочего диаметра

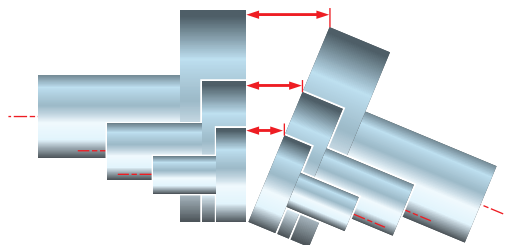
6-дюймовая (152,4 мм) муфта, открытая сверху на 0,005 дюйма (0,127 мм), образует угол между осями вала, равный 0,83 мрад.

Для рабочего диаметра 10 дюймов это соответствует зазору 0,0083 дюйма.

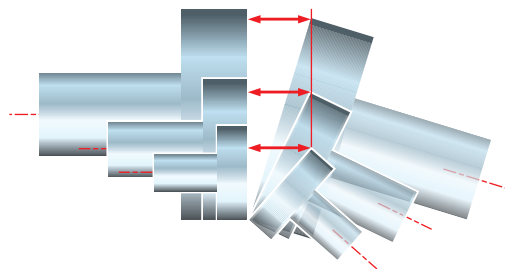
Для рабочего диаметра 100 мм это соответствует зазору 0,083 мм.

Примечание. 1 мрад = 1 тысячная часть дюйма на дюйм

1 мрад = 1 мм на метр

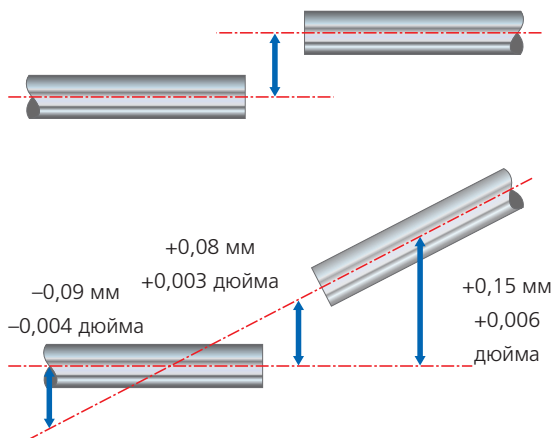


Одинаковый угол — разный зазор



Одинаковый зазор — разный угол

Смещение представляет собой расстояние между осями вращения в заданной точке. Смещение иногда неправильно называют параллельным смещением или расцентровкой обода. Однако оси вращения вала редко бывают параллельными, а отношение обода муфты или вала к осям вращения вала не поддается определению.



Как показано выше, при одном и том же состоянии центровки значение смещения изменяется в зависимости от того места, в котором измеряется расстояние между двумя осями вращения вала. При отсутствии какой-либо другой инструкции смещение измеряется в миллиметрах или тысячных дюйма в центре муфты. Это определение относится к коротким упругим муфтам. В случае распорных муфт смещение следует измерять на плоскостях передачи крутящего момента муфты.

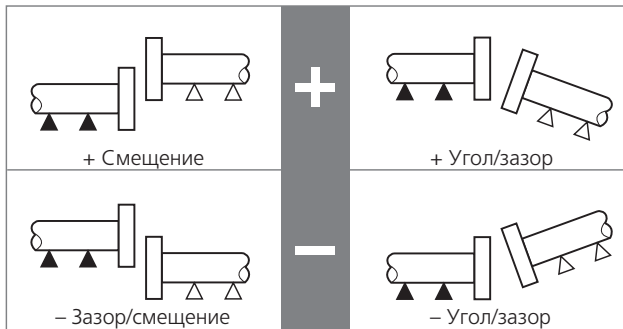
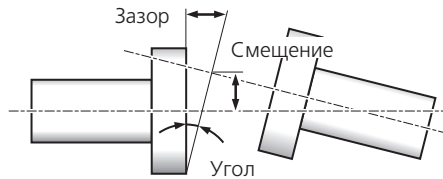
Короткие упругие муфты

Для простоты понимания по нашему определению короткие упругие муфты — это муфты, у которых осевая длина упругого элемента или осевая длина между упругими элементами равна или меньше диаметра муфты. Машины с короткими упругими муфтами, работающими на средней и высокой частоте вращения, требуют очень точной центровки, чтобы избежать чрезмерной нагрузки на валы, подшипники и уплотнения.

Поскольку состояние центровки практически всегда представляет собой комбинацию угла перекоса и смещения и машину необходимо корректировать как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, то для полного описания состояния центровки требуется четыре значения.

- ▶ Вертикальный угол перекоса (или значение зазора относительно диаметра)
- ▶ Вертикальное смещение
- ▶ Горизонтальный угол перекоса (или значение зазора относительно диаметра)
- ▶ Горизонтальное смещение

Если не указано иное, то смещение обозначает расстояние между осями вращения вала в центре муфты. На рисунке, показанном ниже, представлены обозначения и правила знаков.



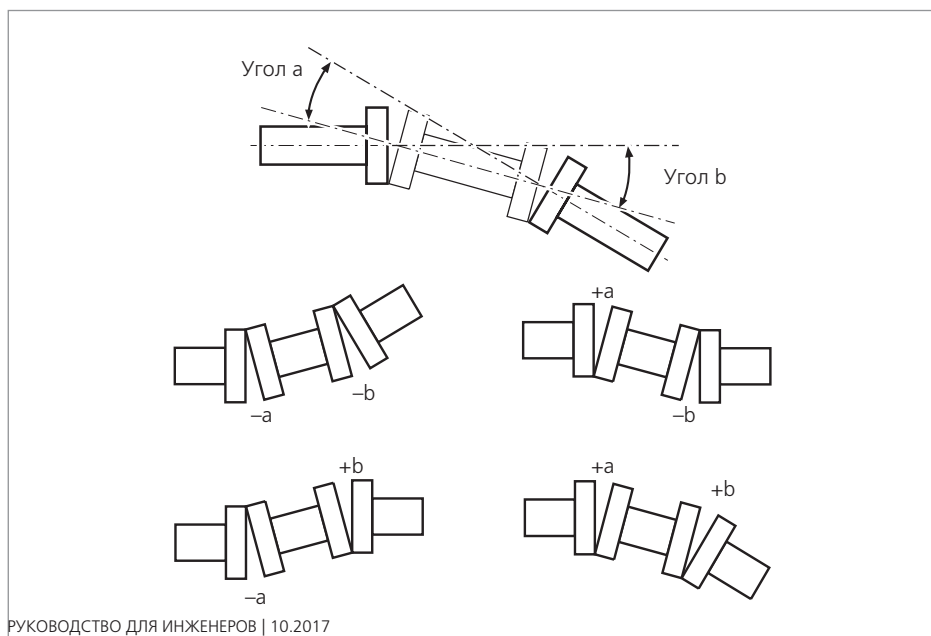
Промежуточные валы

Промежуточные валы, как правило, устанавливаются в тех случаях, когда во время работы машины предполагается значительные изменения центровки, например из-за теплового расширения. При использовании промежуточного вала изменение угла перекося на конце промежуточного вала остается достаточно малым, даже если происходят значительные изменения положения машины. Прецизионная центровка для машин, оснащенных промежуточными валами с упругими элементами на каждом конце, не так важна, как для машин с короткими упругими муфтами. Для полного описания состояния центровки необходимо знать четыре значения.

- ▶ Вертикальный угол a
- ▶ Вертикальный угол b
- ▶ Горизонтальный угол a
- ▶ Горизонтальный угол b

Углы измеряются между осью вращения промежуточного вала и соответствующими осями вращения машины.

На рисунке, показанном ниже, представлены обозначения и правила знаков.



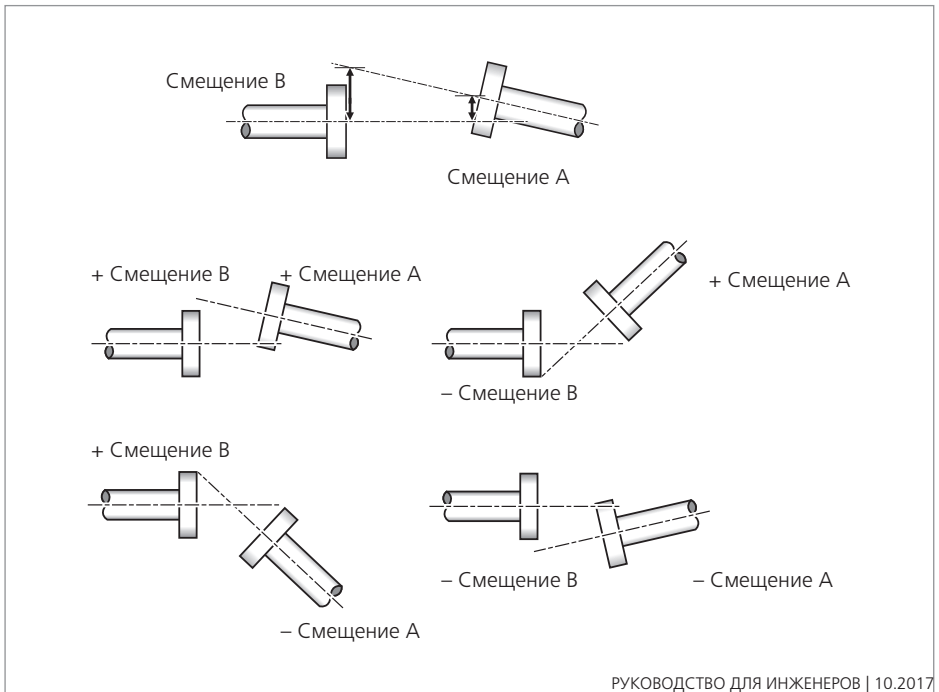
Смещение В — смещение А

В качестве альтернативы двум углам α и β центровка может быть задана значениями смещений.

- ▶ Вертикальное смещение В
- ▶ Вертикальное смещение А
- ▶ Горизонтальное смещение В
- ▶ Горизонтальное смещение А

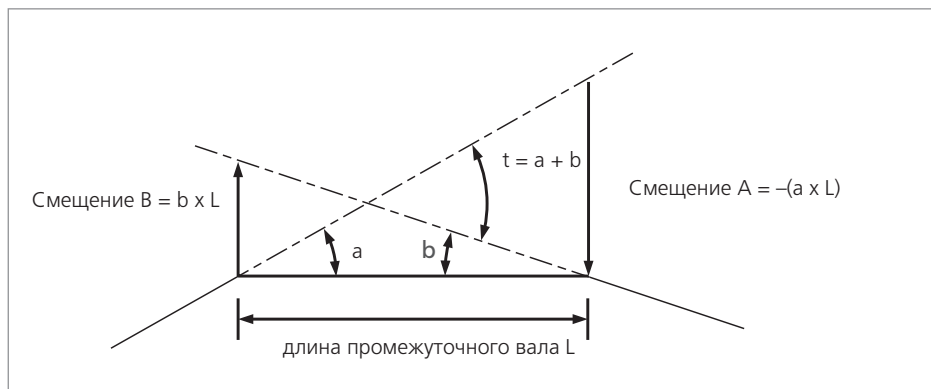
Смещения измеряются между осями вращения вала машины в месте расположения концов промежуточного вала. Это похоже на центровку по методу обратного индикатора.

На рисунке показаны обозначения и правила знаков.



Функциональная зависимость

Изучение показанной ниже диаграммы позволит получить более четкое понимание взаимосвязи между различными смещениями и углами.



НАСКОЛЬКО ТОЧНОЙ ДОЛЖНА БЫТЬ ЦЕНТРОВКА?

Допуски центровки для упругих муфт

Предлагаемые допуски, показанные на следующих страницах, являются общими значениями, основанными на более чем 20-летнем опыте работы компании PRUFTECHNIK в сфере центровки валов, и их не следует превышать. Данные значения необходимо использовать только в том случае, если другие допуски не заданы существующими внутренними стандартами или производителем машины.

Учтите, что все значения являются максимально допустимым отклонением от целевых значений центровки, будь то ноль или некоторое требуемое значение для компенсации теплового расширения. В большинстве случаев быстрый взгляд на таблицу позволит понять, насколько допустимой является расцентровка муфты.

Например, машина с короткой упругой муфтой, работающая с частотой вращения 1500 об/мин, имеет смещения $-0,04$ мм по вертикали и $+0,02$ мм по горизонтали. Оба этих значения попадают в «идеальный» предельный диапазон, равный $0,06$ мм.

Как правило, угол перекоса измеряется в виде разности зазора. При конкретной величине угла перекоса чем больше диаметр, тем шире зазор на ободке муфты. В следующей таблице представлены значения для диаметров муфт, равных 100 мм или 10 дюймам. В случае других диаметров муфт умножьте значение из таблицы на соответствующий коэффициент. Например, машина, работающая с частотой вращения 1500 об/мин оснащена муфтой, диаметр которой равен 75 мм. При таком диаметре максимально допустимый зазор будет равен: $0,07 \text{ мм} \times 75 / 100 = 0,0525 \text{ мм}$.

Для промежуточных валов таблица представляет максимально допустимое смещение для 100 мм или 1 дюйма длины промежуточного вала. Например, машина, работающая с частотой вращения 6000 об/мин и оснащенная промежуточным валом длиной 300 мм, может иметь максимальное смещение: $0,03 \text{ мм} \times 300 / 100 = 0,09 \text{ мм}$ на любой муфте на концах промежуточного вала.

Жесткие муфты не имеют допусков по расцентровке; необходимо обеспечить максимально точный уровень центровки таких муфт.

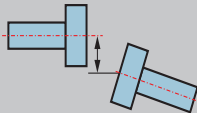
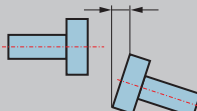
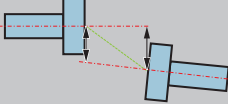
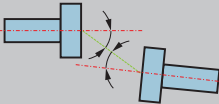
Таблица предлагаемых допусков центровки					
	об/мин	Допуск — [мм]		Допуск — [мил]	
Мягкая лапа	Любые	0,06		2,0	
		Допустимый диапазон	Минимальное отклонение	Допустимый диапазон	Минимальное отклонение
		OK	😊	OK	😊
Короткие упругие муфты					
Смещение 	600			9,0	5,0
	750	0,19	0,09		
	900			6,0	3,0
	1200			4,0	2,5
	1500	0,09	0,06		
	1800			3,0	2,0
	3000	0,06	0,03		
	3600			1,5	1,0
	6000	0,03	0,02		
	7200			1,0	0,5
Угол перекаса (разность зазора на кромке муфты на 100 мм или 10 дюймов диаметра) 	600			15,0	10,0
	750	0,13	0,09		
	900			10,0	7,0
	1200			8,0	5,0
	1500	0,07	0,05		
	1800			5,0	3,0
	3000	0,04	0,03		
	3600			3,0	2,0
	6000	0,03	0,02		
	7200			2,0	1,0

Таблица предлагаемых допусков центровки

	об/мин	Допуск — [мм]		Допуск — [мил]	
		Допустимый диапазон	Минимальное отклонение	Допустимый диапазон	Минимальное отклонение
Промежуточные валы и мембранные муфты		ОК	😊	ОК	😊
Смещение (на 100 мм или 1 дюйм длины пром. вала) 	600			3,0	1,8
	750	0,25	0,15		
	900			2,0	1,2
	1200			1,5	0,9
	1500	0,12	0,07		
	1800			1,0	0,6
	3000	0,07	0,04		
	3600			0,5	0,3
	6000	0,03	0,02		
	7200			0,3	0,2
		Допуск — [мрад]		Допуск — [мрад]	
Угол перекоса (мрад) 	600			3,0	1,8
	750	2,5	1,5		
	900			2,0	1,2
	1200			1,5	0,9
	1500	1,2	0,7		
	1800			1,0	0,6
	3000	0,7	0,4		
	3600			0,5	0,3
	6000	0,3	0,2		
	7200			0,3	0,2

Примечание

Допустимая величина расцентровки промышленного оборудования зависит от многих переменных, включая число об/мин, номинальную мощность, тип муфты, длину промежуточного вала, конструкцию подсоединенного оборудования и ожидания пользователя в отношении срока службы. Поскольку учет всех этих переменных для определения центровки практически нецелесообразен, необходимо ввести некоторое упрощение допусков.

Первые данные о допусках, основанных на числе оборотов и длине распорной втулки муфты, были опубликованы в 1970-х годах. Многие допуски были основаны главным образом на опыте использования смазываемых зубчатых муфт. Однако практический опыт показал, что эти допуски одинаково применимы к подавляющему большинству несмазываемых систем муфт, в конструкции которых применяются упругие элементы.

В предыдущей таблице «допустимые» пределы рассчитаны исходя из скорости скольжения смазанной стали по стали, с использованием значения 12 мм/с для допустимой скорости скольжения. Поскольку эти значения также совпадают с значениями, полученными исходя из скоростей сдвига эластомеров, то их можно применять для коротких упругих муфт с упругими элементами.

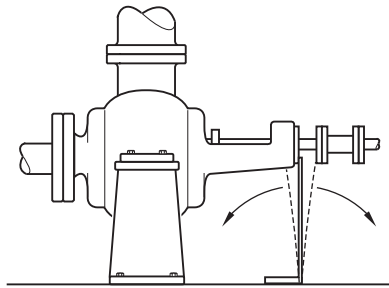
Значения минимального отклонения основаны на наблюдениях, выполненных на широком спектре машин для определения расцентровки, критической по вибрации. Однако соблюдение этих допусков не гарантирует работу без вибрации.

ПОИСК И УСТРАНЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Механическое напряжение муфты и прогиб вала

Новые показания не соответствуют выполненным перемещениям?

Иногда при выполнении центровки с помощью циферблатных индикаторов или лазерных оптических систем показания после корректировки центровки не согласуются с внесенными коррекциями. Одна из возможностей заключается в том, что механическое напряжение муфты изгибает вал, опоры машины или фундамент. Эта проблема часто характерна для насосных агрегатов, которые имеют переднее «устойчивое» крепление, как показано на следующем рисунке.

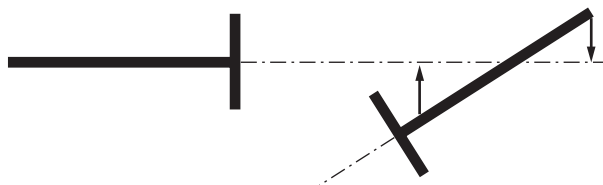


В этом варианте применения упругий элемент муфты является достаточно жестким в радиальном направлении и может влиять на результаты измерения центровки. В таких ситуациях мы советуем отсоединить элемент муфты, чтобы исключить воздействие таких внешних сил на измеренное значение центровки.

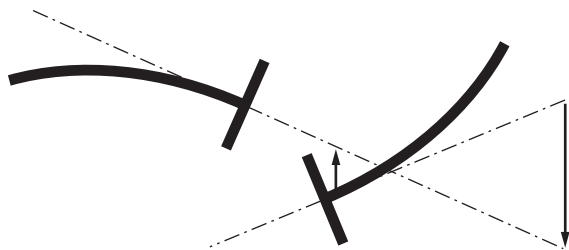
Если не учитывать чистый эффект воздействий, аналогичных указанным выше, то полученное новое значение центровки не только будет ошибочным, но зачастую коррекция будет сделана в направлении, противоположном необходимому направлению коррекции центровки.

В худших случаях механическое напряжение муфты, создаваемое недавно отцентрованными машинами, может приводить к изгибу валов во время работы. В большинстве случаев этот изгиб будет минимальным, однако достаточным для воздействия на результаты измерений осей вращения вала.

Следующие рисунки являются иллюстрацией для потенциальной проблемы

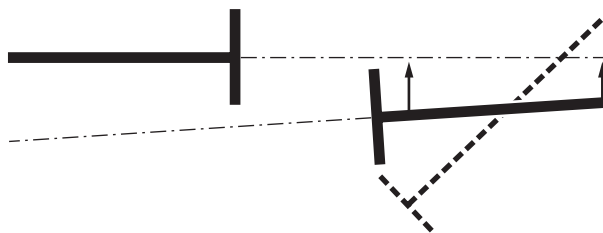


Это состояние центровки с отсоединенными валами.



Это результаты измерений центровки с подсоединенными валами.

Показаны проецируемые осевые линии вращения.



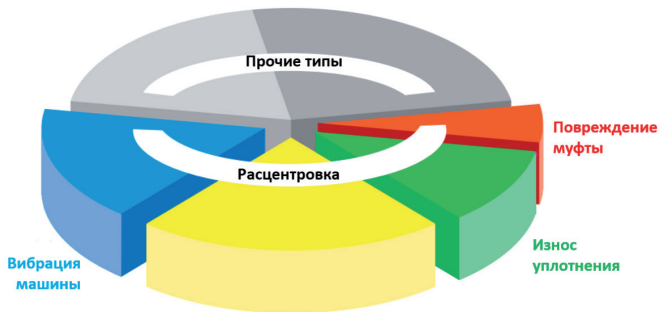
Перемещения выполнены в соответствии с результатами измерений.

В настоящее время механическое напряжение на муфте снижено, и при следующей попытке валы будут отцентрованы надлежащим образом.

Причины разрушения машины

Муфты могут исключить расцентровку?

Часто можно услышать комментарий: «...зачем пытаться центровать машину, если она оснащена упругой муфтой, предназначенной для устранения расцентровки?» Опыт работы и рекомендации производителей муфт по максимальной расцентровке могут предположить обратное. Неопровержимые данные свидетельствуют о том, что более 50 % поломок машин непосредственно связаны с неправильной центровкой валов.



Упругие муфты действительно предназначены для устранения расцентровки, обычно до 10 мм или более от радиального смещения валов. Однако нагрузка на валы, а следовательно, и на подшипники и уплотнения, резко возрастает из-за сил реакции, возникающих в муфте при расцентровке. Например, муфта от компании Vulcan размером 445 мм, рассчитанная на максимальное радиальное смещение 6 мм при частоте вращения 600 об/мин, создает силу реакции, равную 1,2 кН на мм радиального смещения.

Антифрикционные подшипники

Подшипники представляют собой высокоточные компоненты, предназначенные для работы с чистой смазкой и при постоянных рабочих температурах в ограниченном диапазоне. Компоненты, изготовленные с точностью 0,005 мм:

- ▶ не могут работать в течение длительного времени при повышенной температуре, вызванной расцентровкой;
- ▶ не могут работать в условиях загрязнения, вызванного механическим отказом уплотнения с последующим проникновением грязи, песка, металлических элементов или других объектов;

- ▶ не предназначены для длительной работы при осевых ударных нагрузках, вызванных расцентровкой и воздействующих на тщательно обработанные и отшлифованные компоненты.

Помимо повреждений подшипников, вызванных самой расцентровкой, при отказе механических уплотнений необходимо снять подшипники с узла вала, иногда установить повторно или в большинстве случаев заменить. Сами по себе операции снятия и повторной установки могут привести к повреждению подшипника. Большинство производителей насосов и организаций, выполняющих ремонт насосов, рекомендуют обязательно заменять подшипники при ремонте поврежденных насосов независимо от их кажущегося состояния, поскольку очень легко пропустить незначительные повреждения подшипников, которые после повторной установки будут постепенно ухудшаться.

Механические уплотнения

В случае расцентровки валов износ уплотнения возрастает из-за нагрузки вала. Уплотнения насосов являются дорогостоящими деталями, стоимость которых обычно составляет одну треть от общей стоимости насоса. Плохая установка и чрезмерная расцентровка вала существенно сокращают срок службы уплотнения. Производители попытались решить проблему некачественного выполнения установки путем внесения в конструкцию картриджных уплотнений, которые можно устанавливать на месте с минимальными объемами работ по сборке или вообще без них. Однако в состав уплотнений входят прецизионные компоненты, отшлифованные и отполированные с точностью до 2 микрон (0,002 мм). Они не могут работать при плохой центровке; поверхностное трение, повышенные температуры и попадание загрязняющих веществ приводят к быстрому повреждению дорогостоящих компонентов. Отказ уплотнения часто приводит к катастрофическим последствиям, поскольку возникает без особых видимых признаков. Последующий простой установки, а также затраты на замену уплотнений, ремонт насоса и замену подшипников делают отказ уплотнения по причине расцентровки дорогостоящей проблемой, которую можно предотвратить.

Вибрация машины

Вибрация машины возрастает вместе с расцентровкой. Высокая вибрация приводит к усталости компонентов машины и, как следствие, к преждевременному отказу машины.

Суммарные преимущества точной центровки валов

Преимущества, которых можно достичь в результате использования передового опыта в области центровки валов, начинаются с повышения срока службы машины, обеспечивая эксплуатационную готовность установки, когда этого требует производство. Точная центровка оборудования позволяет достичь следующих результатов.

- ▶ Повысить срок службы и надежность установки.
- ▶ Сократить затраты на запасные части, такие как уплотнения и подшипники.
- ▶ Сократить трудозатраты на техническое обслуживание.
- ▶ Повысить уровень эксплуатационной готовности установки.
- ▶ Сократить производственные потери, вызванные остановкой установки.
- ▶ Уменьшить потребность в резервной установке.
- ▶ Повысить безопасность работы установки.
- ▶ Снизить затраты на энергопотребление установки.
- ▶ «Приспособить» эксплуатационные ограничения установки к срокам, необходимым для производства.
- ▶ Получить более выгодные условия по страховке установки за счет применения лучших методов и результатов эксплуатации.

Признаки расцентровки

Не всегда легко обнаружить признаки расцентровки на работающих машинах. Радиальные силы, передаваемые от вала к валу, достаточно сложно измерить снаружи. Использование анализа вибрации или инфракрасной термографии позволяет идентифицировать первичные признаки расцентровки, в частности высокую вибрацию в радиальном и осевом направлениях или повышенный перепад температур в корпусах машин. При отсутствии такой аппаратуры можно найти вторичные признаки неисправности машин, которые могут указывать на неточную центровку валов.

- ▶ Ослабление или поломка фундаментных болтов.
- ▶ Ослабление пакетов прокладок или установочных пальцев.
- ▶ Повышенная утечка масла из уплотнений подшипников.
- ▶ Ослабление или поломка болтов муфты.
- ▶ Некоторые конструкции упругих муфт сильно нагреваются при расцентровке. Если муфта оснащена эластомерными элементами, проконтролируйте наличие резинового порошка внутри кожуха муфты

- ▶ Аналогичные установки меньше вибрируют или имеют более длительный срок службы.
- ▶ Необычно высокая скорость отказов или износа муфты.
- ▶ Чрезмерное количество смазки или масла внутри ограждений муфт.

Поломки валов или трещины у внутренних подшипников или ступиц муфты. Передовой опыт в области центровки валов должен стать ключевой стратегией техобслуживания вращающихся машин. Машина, центрованная надлежащим образом, станет надежным активом для установки. Она будет использоваться тогда, когда она необходима, и потребует выполнения меньшего объема планового (и внепланового) техобслуживания. Далее будут рассмотрены некоторые конкретные практические примеры, которые покажут, каким образом центровка валов может значительно повысить рентабельность действующих установок. Тем не менее в следующем разделе этого руководства будут рассмотрены различные методы центровки валов, которые могут применяться для обеспечения правильной центровки установленного оборудования.

МЕТОДЫ И ПРАКТИКА ЦЕНТРОВКИ

Существует множество различных методов, позволяющих обеспечить приемлемую центровку вращающейся машины. Они варьируются от простого и дешевого метода использования поверочной линейки до более сложных и неизбежно более дорогих методов использования лазерных систем. Все методы можно разделить на три основные категории.

- ▶ Визуальные средства — поверочная линейка и измерительные калибры
- ▶ Циферблатные индикаторы — механические приборы измерения перемещений
- ▶ Лазерные оптические системы центровки

Для каждой категории существует несколько вариантов и модификаций. Мы не будем оценивать все эти модификации. Мы лишь хотим сосредоточиться на некоторых, наиболее широко используемых методах в каждой категории.

Важная роль подготовки

Первый подготовительный шаг к успешной центровке заключается в том, чтобы обеспечить требуемое перемещение машин, на которых выполняется центровка. Это включает возможность перемещения по вертикали как вверх (обязательно с использованием надлежащего подъемного оборудования), так и вниз, если машину необходимо опустить, как это часто бывает необходимо. Это может быть достигнуто путем установки регулировочных прокладок толщиной от 2 до 4 мм (0,08–0,16 дюйма) под опорами обеих машин при первоначальной установке. Рекомендуется с самого начала установить прокладки под обе машины, чтобы позднее в случае необходимости компенсировать изменение состояния фундамента.

Горизонтальное позиционирование машин лучше всего выполнять с помощью домкратных болтов, простого тянущего приспособления или гидравлического оборудования, которые позволяют медленно, осторожно и непрерывно осуществлять точное управление перемещением. Такие методы, как постукивание молотком, затрудняют точное позиционирование и могут повредить машину (например, образуя выбоины на подшипниках). Возникающая вибрация может сместить систему центровки во время действия функции активного сдвига и, следовательно, привести к менее точному мониторингу корректирующего позиционирования.

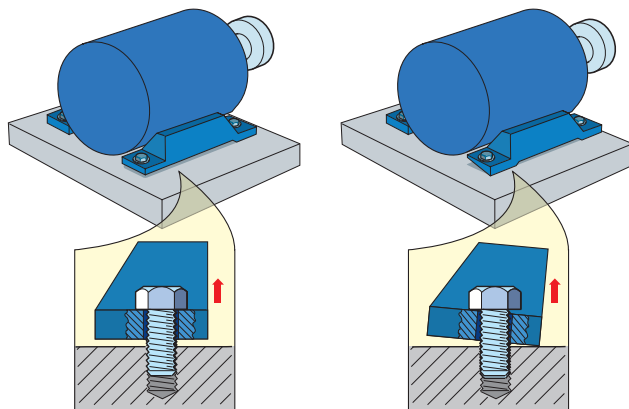
Инструкции по установке машины

При установке таких механизмов, как насос, редуктор, компрессор или другого оборудования установки, необходимо соблюдать некоторые общие правила.

- ▶ Обычно сначала устанавливают ведомую машину, а затем выполняют центровку первичного привода или двигателя с валом ведомого устройства.
- ▶ Если ведомая машина приводится в действие с помощью редуктора, то этот редуктор должен быть отцентрован по ведомому устройству, а привод — по редуктору.
- ▶ Для определения точности муфт машины необходимо провести основные проверки, т. е. проверить «выбег» (концентричность и прямоугольность на осевых линиях вала) на полумуфтах, используя циферблатный индикатор, если это возможно. Неточная установка полумуфт может вызывать проблемы с балансировкой.
- ▶ Подготовка опорных плит, монтажных поверхностей машины, опор, оснований и аналогичных фундаментов машины имеет первостепенное значение. При ненадлежащем выполнении такой подготовки невозможно обеспечить точную центровку.
- ▶ Очистите, выровняйте и удалите любые заусенцы с монтажных поверхностей и из крепежных болтовых отверстий.
- ▶ Подготовьте качественные прокладки для обеспечения точной и эффективной центровки.
- ▶ Перед сборкой системы центровки вала/приборов на машинах проверьте центровку муфты/вала. Помните о том, что первой измерительной системой являются ваши глаза.
- ▶ Убедитесь в том, что комплект «насос — двигатель» установлен прямо на опорную плиту (проверка неплотно прилегающей опоры) и при необходимости выполните корректировку — см. следующие страницы.
- ▶ Не используйте слишком много прокладок; если возможно, не более 3 прокладок под опорами/креплениями машины.
- ▶ Скорректируйте состояние центровки по мере необходимости, чтобы во время работы машины ее валы были центрированы в своих подшипниках в соответствии с допусками производителей.
- ▶ Перед началом работы обязательно проверьте показатели центровки, предоставленные производителем.
В случае повышения температуры могут потребоваться специальные смещения центровки в «холодном» состоянии.
- ▶ Убедитесь, что любые трубопроводы, прикрепленные к машинам, установлены на подходящие опоры, но свободно перемещаются при тепловом расширении.

Измерение и коррекция неплотно прилегающей опоры

Важным компонентом любой успешной процедуры центровки является определение и коррекция неплотно прилегающей опоры. Подобно тому как нас раздражает шаткий стул или стол, неустойчивое крепление машины вызывает нарушение центровки. При каждой попытке центровки машина занимает разное положение, и каждый набор проверочных измерений указывает на то, что машина все еще расцентрована. Кроме того, при закручивании болтов машины механическое напряжение переходит на корпус машины и подшипников. Фактически существует два типа неплотно прилегающей опоры, как показано на рисунке ниже.



Параллельная неплотно прилегающая опора

Опора, неплотно прилегающая
в угловом направлении

В случае параллельной неплотно прилегающей опоры опорная плита и опора машины параллельны друг другу. Это можно скорректировать, просто добавляя прокладки соответствующей толщины. Возникновение опоры, неплотно прилегающей в угловом направлении вызвано тем, что опоры машины образуют угол по отношению друг к другу. Эту ситуацию сложнее диагностировать и скорректировать. Одним из решений является использование конических прокладок для заполнения углового пространства между опорной плитой и опорой. Более радикальное, но долгосрочное решение состоит в том, чтобы снять машину и отшлифовать поверхности опоры машины.

Измерение неплотно прилегающей опоры

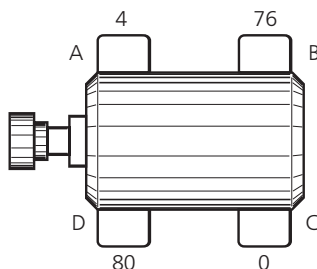
Перед началом центровки для определения неплотно прилегающей опоры можно использовать один из следующих методов.

Используя циферблатный индикатор, установленный на магнитной опоре, поместите указатель над одной из опор машины; обнулите индикатор, а затем ослабьте опору машины. Запишите любое изменение показания индикатора. Затяните опору машины. Повторите эту процедуру для всех опор машины.

Используя набор щупов, ослабляйте по одной опоре за раз; измерьте зазор, который появляется под ослабленной опорой машины, и запишите его. Затяните опору машины и перейдите к следующей опоре.

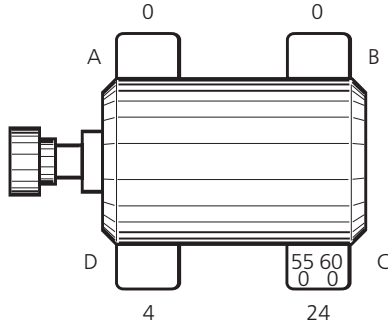
Используя систему лазерной центровки, ослабляйте по одной опоре машины за раз. Система центровки регистрирует количество подъемов опоры для каждой опоры. Затяните опору машины и только потом переходите к следующей опоре.

Определив величину неплотного прилегания опоры, как указано ниже, можно выполнить регулировку машины в соответствии с выявленным состоянием неплотно прилегающей опоры.

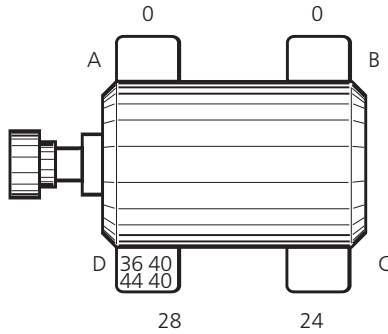


В этом примере продемонстрированы классические проблемы с неплотно прилегающей опорой, приводящие к качанию между опорами B и D. Кажется разумным отрегулировать обе опоры прокладками, чтобы устранить качание, но это было бы ошибкой. Наилучшим решением будет установка прокладки только под одну опору 80/100 мм и повторная проверка всех четырех опор.

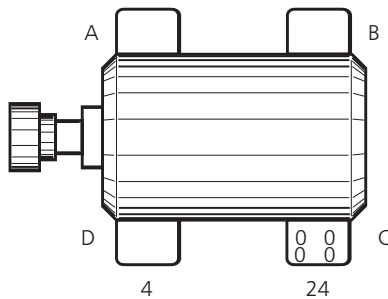
Во время подготовки может обнаружиться множество дополнительных проблем с неплотно прилегающей опорой, включая механическое напряжение согнутых опор, вызванное воздействием трубопровода, или «мягкую» опору, образовавшуюся при установке слишком большого количества прокладок под опорами машины. На следующих рисунках показан ряд примеров.



Пример неплотно прилегающей опоры: согнутая опора — установить прокладку под опорой C и повторно проверить все опоры



Пример неплотно прилегающей опоры: механическое напряжение от трубы — устранить внешние воздействия



Пример неплотно прилегающей опоры: «мягкая» опора — проверить количество прокладок под всеми опорами, установить не более 3 прокладок и перепроверить

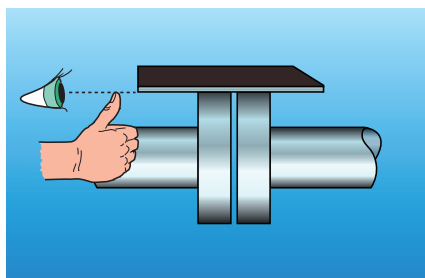
При устранении неплотно прилегающей опоры выполните следующие действия.

- ▶ Проверьте все четыре опоры машины. Устраните зазор для любой опоры, показание для которой превышает 0,08 мм.
- ▶ Исследуйте опору с самым большим зазором (или две, если они имеют одинаковое значение) с помощью щупов, чтобы определить тип неплотно прилегающей опоры. Можно осмотреть и другие опоры, однако сначала сосредоточьтесь на поиске и устранении наибольшей проблемы.
- ▶ Устраните выявленное состояние, установив прокладки только под одной опорой, если это возможно.
- ▶ Если зазоры всех опор находятся в пределах допуска, начните операцию по центровке.

Методы центровки — визуальный метод

Поверочная линейка

Этот метод центровки валов долгое время считался обычной практикой для многих установок при использовании упругой муфты. Считалось, что достаточно выставить центровку на «глазок» и закрутить болты машины. Система, безусловно, является дешевой, и оборудование всегда доступно.



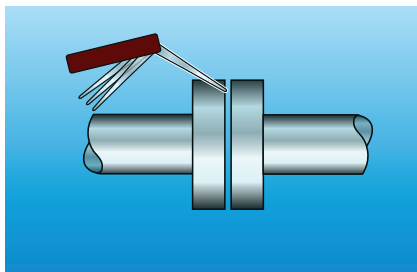
Как правило, корректирующие значения для опор машины оценивались в соответствии с опытом инженера, выполняющего центровку. Чаще всего коррекцию опор машины приходилось повторять методом проб и ошибок до тех пор, пока не достигалось визуальное состояние центровки. Даже в этом случае не было уверенности в том, что центровка выполнена правильно. Поскольку разрешение человеческого глаза ограничено 0,1 мм, точность центровки ограничена соответствующими пределами. Кроме того, без тщательных проверок точности установки муфты на валу невозможно провести прямую корреляцию между выполненной и фактической центровкой валов машины.

В лучшем случае этот метод центровки можно описать в качестве центровки муфты, а не вала, как определено ранее.

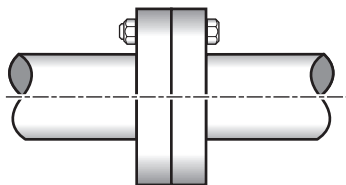
Измерительный щуп

Несмотря на то что этот метод классифицируется в качестве «визуального» метода центровки вала, метод щупа, при определенных обстоятельствах и для некоторых

машин, может быть совершенно приемлемым. При установке и центровке турбоагрегатов, где полумуфта является неотъемлемой частью вала ротора и не имеет упругих элементов, опытный инженер по турбинам может отцентровать обе полумуфты с большой точностью. (Как отмечено в разделе допусков для центровки, для таких «сплошных» типов муфт смещение или зазор не допускаяется.)



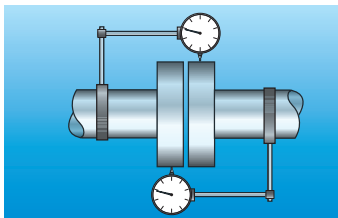
Используя измерительный щуп или штангенциркуль, инженер точно измеряет любой зазор между полумуфтами. Затем используется масляный насос поднимания для поворота валов вместе на 180 градусов, после чего вновь проверяется «зазор» (при отключенном масляном насосе поднимания). Затем эта процедура выполняется для измерений горизонтальной центровки.



Показания отображаются в виде графика, чтобы установить состояние центровки и определить любые необходимые коррекции. В некоторых случаях инженеры будут поворачивать один вал на 180 градусов и снимать дополнительные показания. Затем эти показания усредняются для устранения любых возможных неточностей машинной обработки вала. Усредненные показания составляют основу графика центровки. На машинах, где используются муфты с упругими элементами, использование щупов подвержено тем же ограничениям, что и метод поверочной линейки, и данный метод можно отнести только к методу центровки муфт.

Методы центровки — циферблатные индикаторы

Использование циферблатных индикаторов для подавляющего большинства задач центровки валов, где используется упругая муфта, является существенным продвижением вперед к точным методам центровки валов.



Существует множество наборов циферблатных индикаторов, которые можно использовать для центровки машин, некоторые из которых будут рассмотрены в этом разделе. Факторы, которые должен учитывать инженер перед тем, как приступить к центровке методом циферблатных индикаторов, включают следующие.

Прогиб кронштейна индикатора



Перед началом центровки необходимо обязательно измерить прогиб, независимо от того, насколько прочным выглядит кронштейн (см. раздел по измерению прогиба).

Внутреннее трение / гистерезис



Иногда приходится постукивать по индикатору, чтобы стрелка заняла окончательное положение.

Разрешение 1/100 мм



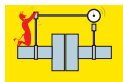
При каждом считывании показания может возникнуть ошибка округления до 0,005 мм. Эта ошибка может накапливаться для полного набора показаний.

Ошибки считывания



Простые ошибки возникают тогда, когда показания циферблатов считываются в сложных условиях или в спешке.

Люфт в механическом соединении



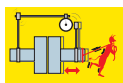
Небольшая величина люфта может остаться незамеченной, однако она приведет к большим ошибкам считывания.

Перекос при установке циферблатных индикаторов



Если индикатор расположен не совсем перпендикулярно измеряемой поверхности, то это приводит к потере части значений смещения.

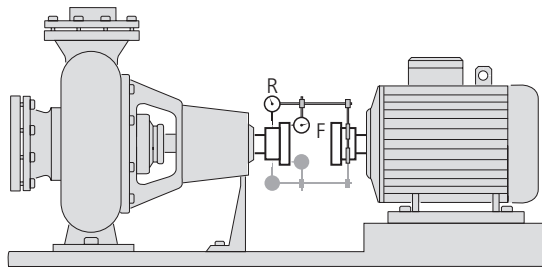
Осевой люфт валов



Осевой люфт валов будет влиять на точность показаний по торцевым поверхностям, используемым при измерениях углов перекоса, если не использовать два установленных по осям индикатора.

Центровка с помощью индикаторов (на ободке и торце) — метод проб и ошибок

Интерпретация показаний центровки валов с использованием циферблатных индикаторов, с учетом таких факторов, как прогиб кронштейна, требует знания основ математики и геометрии. В некоторых случаях эти знания ограничены и применяется грубая процедура проб и ошибок, где игнорируются прогиб кронштейна и колебание вала. Кроме того, во время измерения вращается только один вал, добавляя ошибки к центровке, вызванные биением муфты и изгибом вала.



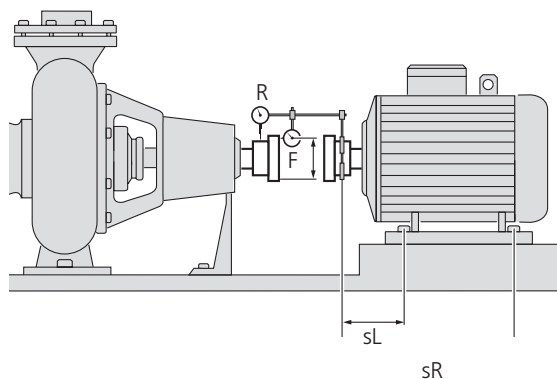
На рисунке выше показан сценарий такого измерения. Метод центровки с помощью индикаторов определяют положения фиксированной муфты машины на условном циферблате часов. Индикаторы обнуляются в положении на «12 часов», а вал машины, которую нужно переместить, поворачивается на половину оборота в положение «6 часов». Опору, ближайшую к муфте, поднимают (или опускают) на величину, равную половине показаний индикатора обода. Под опору, наиболее удаленную от муфты, помещают несколько прокладок до тех пор, пока показания индикатора профиля не будут изменяться вместе с вращением вала.

Аналогичным образом индикаторы обнуляются в положении «3 часа» и поворачиваются до положения «9 часов» для горизонтальной коррекции.

Как правило, можно легко определить, что эта процедура использовалась для центровки, поскольку под задними опорами машины часто наблюдаются несколько тонких прокладок. Обычно эта процедура проб и ошибок приводит к появлению значительных ошибок расцентровки на плоскостях передачи крутящего момента муфты. Если возможно, то от этого метода следует отказаться в пользу других методов с помощью циферблатных индикаторов или лазерной центровки.

Центровка с помощью индикаторов — метод расчета

В качестве измерительного устройства для такого типа центровки используется циферблатный индикатор. Стрелка индикатора указывает на деления, отмеченные на циферблате. Когда ножка задвигается в корпус, стрелка индикатора вращается по часовой стрелке. Количество индикаторных меток, на которые движется стрелка, равно расстоянию, на которое ножка индикатора переместилась внутрь корпуса. Если ножка выдвигается из корпуса, то стрелка также показывает расстояние перемещения. Значение счетчика циферблата является положительным, когда ножка перемещается внутрь, и отрицательным, если она перемещается наружу.



Центровка с помощью индикаторов берет свое название от положений ножек индикатора во время измерений. Выше показана стандартная настройка индикатора. После установки два вала вращаются вместе, а показания циферблатов считываются в положениях 12:00, 3:00, 6:00 и 9:00 часов.

Формулы для расчета коррекции центровки

При таких настройках центровка МТВМ в плоскости индикаторной ножки выглядит следующим образом.

- ▶ $VO = (R6 - R0 - RS) / 2$
- ▶ $VA = (F6 - F0 - FS) / \text{диам.}$
- ▶ $HO = (R9 - R3) / 2$
- ▶ $HA = (F9 - F3) / \text{диам.}$

Где

VO/VA = вертикальное смещение/угол перекоса

HO/HA = горизонтальное смещение/угол перекоса

R0 = показание на ободе в положении 12:00 часов

R3 = показание на ободе в положении 3:00 часа

R6 = показание на ободе в положении 6:00 часов

R9 = показание на ободе в положении 9:00 часов

F0 = показание на торце в положении 12:00 часов

F3 = показание на торце в положении 3:00 часа

F6 = показание на торце в положении 6:00 часов

F9 = показание на торце в положении 9:00 часов

Диам. = диаметр круга, пройденный ножкой индикатора на торце

RS = прогиб индикатора на ободе

FS = прогиб индикатора на торце *

s = расстояние от измерительной плоскости (ножка индикатора на ободе) до опоры машины (спереди или сзади); это значение может быть положительным или отрицательным

Поворот по часовой стрелке определяется при взгляде вдоль вала от перемещаемой (MTBM) к неподвижной (STAT) машине.

- ▶ Прокладка = $(VA)(s) - VO$
- ▶ Прокладка = $(F6 - F0 + FS)(s) / \text{диам.} - (R0 - R6 + RS) / 2$
- ▶ Перемещение = $(HA)(s) - HO$
- ▶ Перемещение = $(F9 - F3)(s) / \text{диам.} - (R3 - R9) / 2$

Если циферблатные индикаторы установлены на ноль в положении 12:00, а затем их показания считаны в положении 6:00, то прокладка рассчитывается следующим образом:

- ▶ Прокладка = $(F6 - FS)(s) / \text{диам.} - (R6 - RS) / 2$

Положительный результат означает добавление прокладок; отрицательный результат означает удаление прокладки.

Если циферблатные индикаторы установлены на ноль в положении 3:00, а затем их показания считаны в положении 9:00, то перемещение рассчитывается следующим образом:

- ▶ Перемещение = $(F9)(s) / \text{диам.} - R9 / 2$

Положительное значение означает перемещение к положению 3:00; отрицательное — к положению 9:00.

Расчеты прокладки и перемещения должны выполняться дважды, один раз для передних опор и один раз для задних.

Правило проверки достоверности показаний индикатора

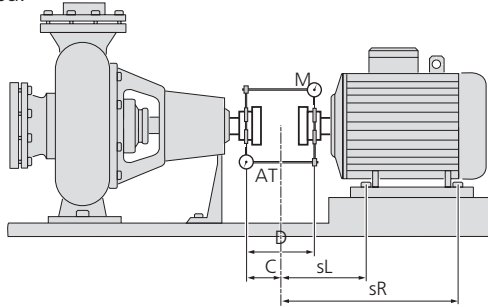
Сумма показаний на 3 и 9 часов должна быть равна сумме на 12 и 6 часов. Это правило достоверности применяется как к радиальным, так и к торцевым показаниям.

Прогиб

Основным источником ошибки в описанной выше процедуре является прогиб рычага для затяжки. Эта ошибка может повлиять на размеры прокладок до такой степени, что машина будет сильно расцентрована. Чтобы скомпенсировать этот прогиб, измерьте его, а затем прибавьте показание прогиба (оно может быть положительным или отрицательным) к показаниям на 6:00 часов (см. предыдущие формулы).

Метод обратного индикатора — путем расчета

Метод центровки с использованием метода обратного индикатора представляет собой наиболее усовершенствованный метод центровки с помощью циферблатных индикаторов. Он рекомендован Американским институтом нефти (API 686) для использования в качестве предпочтительного метода центровки с помощью циферблатного индикатора.



Метод центровки с использованием метода обратного индикатора получил свое название от положений индикаторов, которые установлены на противоположных полумуфтах и направлены навстречу друг другу. Выше показана стандартная настройка индикатора.

После установки два вала вращаются вместе, а показания циферблатов считываются в положениях 12:00, 3:00, 6:00 и 9:00 часов.

Формулы для расчета центровки по методу обратного индикатора

При таких настройках центровка в центре муфты выглядит следующим образом.

- ▶ $VO = (S6 - S0 - SS) / 2 - (S6 - S0 - SS + M6 - M0 - MS) C / 2D$
- ▶ $VA = (S6 - S0 - SS + M6 - M0 - MS) / 2D$
- ▶ $HO = (S9 - S3) / 2 - (S9 - S3 + M9 - M3) C / 2D$
- ▶ $HA = (S9 - S3 + M9 - M3) / 2D$

Где

VO/VA = вертикальное смещение/угол перекоса

HO/HA = горизонтальное смещение/угол перекоса

S0 = показание на левом ободе в положении 12:00 часов

S3 = показание на левом ободе в положении 3:00 часа

S6 = показание на левом ободе в положении 6:00 часов

S9 = показание на левом ободе в положении 9:00 часов

M0= показание на правом ободе в положении 12:00 часов

M3= показание на правом ободе в положении 3:00 часа

M6= показание на правом ободе в положении 6:00 часов

M9= показание на правом ободе в положении 9:00 часов

D = расстояние между левым и правым индикаторами

C = расстояние между левым индикатором и центром муфты

SS = прогиб индикатора на левом ободе (*)

MS= прогиб индикатора на правом ободе (*)

sL = расстояние от центра муфты до передних опор правой машины

sR = расстояние от центра муфты до задних опор левой машины

(*) Эти значения могут быть положительными или отрицательными.

Коррекции для опор правой машины можно рассчитать следующим образом.

$$\blacktriangleright \text{Прокладка для передней опоры} = (VA * sL) - VO$$

$$\blacktriangleright \text{Прокладка для задней опоры} = (VA * sR) - VO$$

Положительный результат означает добавление прокладки; отрицательный результат означает удаление прокладки.

$$\blacktriangleright \text{Перемещение передних опор} = (HA * sL) - HO$$

$$\blacktriangleright \text{Перемещение задних опор} = (HA * sR) - HO$$

Положительный результат означает перемещение в положение 3 часов; отрицательный результат означает перемещение в положение 9 часов.

Если циферблатные индикаторы установлены на ноль в положении 12 часов, а их показания считаны в положении 6 часов, то прокладка рассчитывается следующим образом.

$$\blacktriangleright \text{Прокладка для передних опор} = (S6 - SS + M6 - MS) (C + sL) / 2D - (S6 - SS) / 2$$

$$\blacktriangleright \text{Прокладка для задних опор} = (S6 - SS + M6 - MS) (C + sR) / 2D - (S6 - SS) / 2$$

Положительный результат означает добавление прокладки; отрицательный результат означает удаление прокладки.

Если циферблатные индикаторы установлены на ноль в положении 3 часов, а затем их показания считаны в положении 9 часов, то перемещение рассчитывается следующим образом.

$$\blacktriangleright \text{Перемещение для передних опор} = (S9 + M9) (C + sL) / 2D - S9 / 2$$

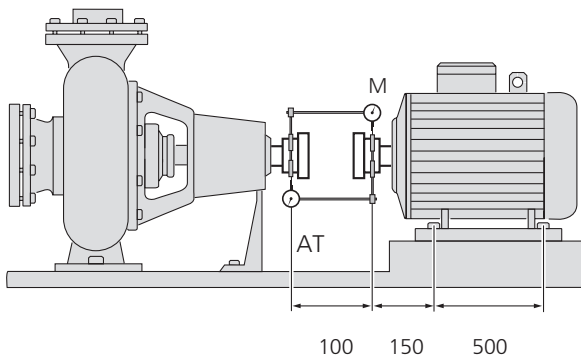
$$\blacktriangleright \text{Перемещение для задних опор} = (S9 + M9) (C + sR) / 2D - S9 / 2$$

Положительный результат означает перемещение в положение 3 часов; отрицательный результат означает перемещение в положение 9 часов.

Расчеты прогиба см. в следующем разделе.

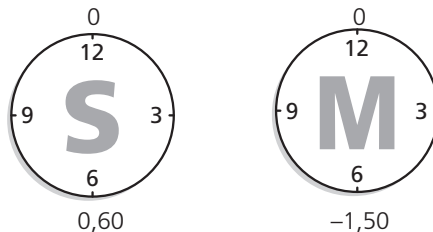
Метод обратного индикатора — с помощью графика

Расчеты, описанные в предыдущем разделе, могут быть достаточно сложны для многих инженеров, и в отличие от результатов измерений индикаторами коррекции методом проб и ошибок невозможны. Чтобы избежать выполнения математических вычислений, можно использовать графическое решение для определения состояния центровки и необходимых корректировок прокладками и перемещения.



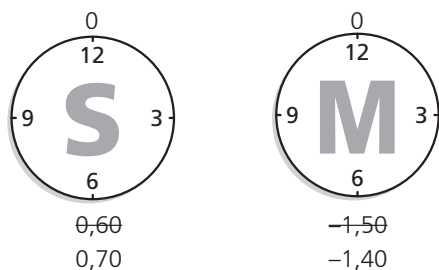
На рисунке выше показана типичная конфигурация метода обратного индикатора, где правая машина является перемещаемой (МТВМ). Оба индикатора обнуляются, когда они находятся в положении 12 часов. Направление взгляда — от МТВМ к неподвижной машине.

Вал поворачивается на 180 градусов в нормальном направлении вращения вала. Значения на циферблате считываются и записываются. В качестве примера предположим, что были сняты следующие показания.



Все значения указаны в мм.

Прогиб кронштейна индикатора составлял $-0,10$ мм. Таким образом, общие показания индикатора (T.I.R.) после коррекции прогиба кронштейна определены следующим образом.

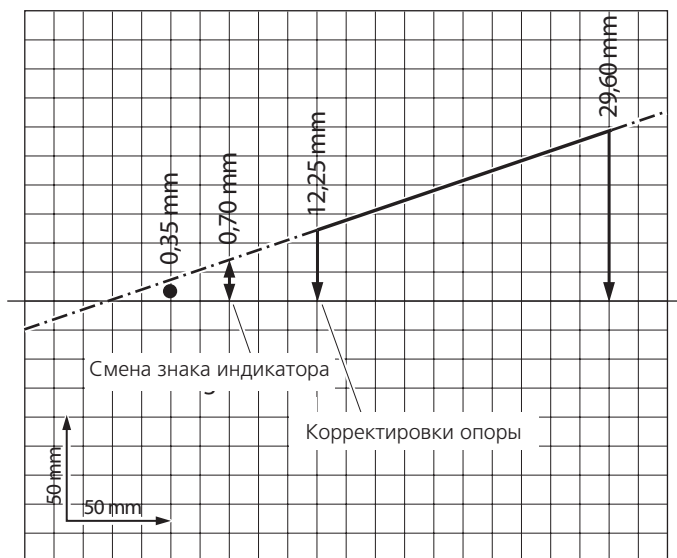


Значения T.I.R. необходимо разделить на 2, чтобы определить истинные значения смещения вала в плоскостях циферблатных индикаторов.

$$\text{Смещение S} = +0,70 / 2 = +0,35 \text{ мм}$$

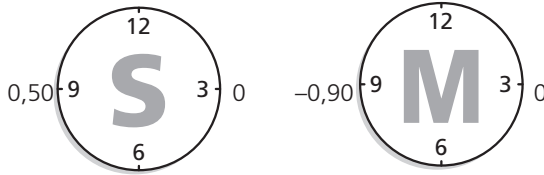
$$\text{Смещение M} = -1,40 / 2 = -0,70 \text{ мм}$$

Затем эти смещения отображаются на графике следующим образом.



Потом оба индикатора обнуляются в положении на 3 часа. Вал поворачивается на 180 градусов в нормальном направлении вращения. Показания записываются. При возврате валов в положение на 3 часа показания индикатора должны вернуться к нулю.

Предположим, что были сняты следующие показания.



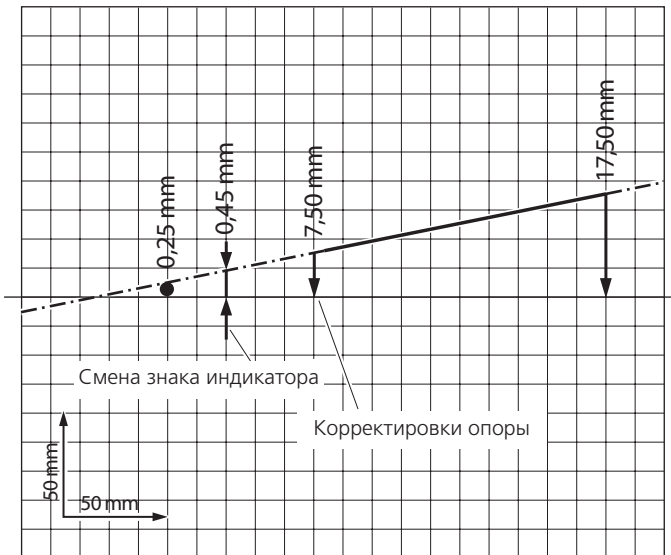
Значения коррекции прогиба не применимы для горизонтальных показаний.

Значения T.I.R. необходимо разделить на 2, чтобы определить истинные значения смещения вала в плоскостях циферблатных индикаторов.

$$\text{Смещение S} = +0,50 / 2 = +0,25 \text{ мм}$$

$$\text{Смещение M} = -0,90 / 2 = -0,45 \text{ мм}$$

Затем эти смещения отображаются на графике следующим образом.



Вертикальные и горизонтальные коррекции при помощи прокладок показаны на каждом графике. Коррекция выполняется исходя из предположения, что центровка должна составлять 0,0/0,0 в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Любые показатели производителей или расчетные показатели для теплового расширения должны быть учтены в этих корректировках при помощи прокладок или в исходных показаниях циферблатного индикатора.

Измерение прогиба кронштейна индикатора

Для измерения прогиба установите все измерительные приспособления (кронштейны, стержни и индикаторы) на кусок прямой трубы. Отрегулируйте приспособления таким образом, чтобы кронштейны были расположены на одном и том же расстоянии друг от друга, как если бы они были установлены на самой машине. Аналогично расположите индикаторы как можно ближе к тому положению, в котором они будут установлены на машине. Удерживая индикаторы в положении 12 часов, обнулите циферблаты. Поворачивайте трубу до тех пор, пока показания индикаторов не достигнут 6:00. Считайте и запишите показания циферблатных индикаторов (значение индикатора на ободке будет отрицательным, значение индикатора на торце может быть положительным или отрицательным, но обязательно близким к нулю).

Методы центровки — лазерная центровка валов

Лазерная центровка валов стала популярной в середине 1980-х годов, когда компания PRUFTECHNIK представила систему OPTALIGN®, первую в мире коммерчески доступную компьютерную систему лазерной центровки валов. Несмотря на свою относительно высокую цену, система быстро приобрела популярность у инженеров и компаний во многих отраслях промышленности по всему миру.

Система OPTALIGN® предлагает большое число значительных преимуществ для быстрой и точной центровки соединенных вращающихся машин. С момента внедрения первой системы разработки в области лазерной и микропроцессорной технологии позволили вывести на рынок новое поколение лазерных систем, предлагающих пользователю простые в понимании системы под управлением меню, которые могут использоваться практически для любой задачи центровки валов независимо от их сложности или размера.

Как мы увидели в предыдущих разделах, при использовании механических методов центровки валов необходимо учитывать ряд важных соображений. Кроме того, вычисления значений корректировки центровки могут быть сложными и не исключают ошибок. Ни одно из этих соображений не применимо к лазерной центровке вала. Если на установке применяется лазерная центровка валов, это обеспечивает доступ к высокоточной центровке вала и преимуществам, которые она приносит (см. следующий раздел).

Далее представлено краткое описание преимуществ лазерных систем.

- ▶ Точная центровка без ручного ввода данных и выполнения графических или числовых вычислений.
- ▶ Графическое отображение результатов центровки на плоскостях передачи энергии муфты и информация по необходимым прокладкам и значениям корректировки для опор машины.
- ▶ Отсутствие механических приспособлений — отсутствие прогиба.
- ▶ Отсутствие необходимости разборки муфты для выполнения центровки.
- ▶ Не надо снимать показания в заданных точках, таких как 12:00, 3:00, 6:00 и 9:00 часов; результаты могут быть получены при повороте вала менее чем на 90 градусов.
- ▶ Хранение и распечатка результатов для формирования отчета о состоянии центровки.

- ▶ Сертифицированная калиброванная точность лазерной системы в соответствии с требованиями ISO 9000.
- ▶ Универсальные системы кронштейнов, которые охватывают любые типы приложений для центровки; отсутствие необходимости в специальных кронштейнах типа «рождественская елка» для измерения длинного промежуточного вала.
- ▶ Система оператора, управляемая с помощью меню, позволяет использовать широкий спектр инженерных навыков и дисциплин.
- ▶ Активное динамическое отображение вертикальных и горизонтальных поправок во время корректировки центровки.
- ▶ Встроенные стандарты центровки по принципу «да/нет» для анализа точности центровки.

Определив некоторые преимущества и выгоды, которые можно получить с помощью системы лазерной центровки для центровки валов, важно установить функциональность системы центровки, которая будет соответствовать требованиям пользователя. Существуют несколько доступных систем и ряд производителей, которые предлагают системы лазерной центровки.

Выбранная вами система должна обладать как минимум следующими возможностями.

- ▶ **Сертифицированная калибровка по прослеживаемому стандарту**
Нет смысла приобретать систему для точной центровки валов, которая не может обеспечить требуемую точность измерений.
- ▶ **Высокая точность и повторяемость**
Недостаточная точность просто приводит к неправильным значениям коррекции. Высокая повторяемость означает, что для получения достаточных данных для вычисления точных результатов требуется меньше измерений.
- ▶ **Прочный, водостойкий, ударопрочный и пылезащитный корпус**
Прочный корпус означает, что использование на открытом воздухе во влажных условиях не представляет никакой проблемы. Прочные инструменты с гарантированной надежностью уплотнения, согласно стандартам IP (65 и 67), позволяют выполнять работу даже в неблагоприятных условиях.
- ▶ **Возможность возобновления измерений**
Возобновление позволяет легко перезапустить операцию по центровке после

прерывания или в начале нового дня без необходимости ввода целевых значений и размером пользователем. Система даже сохраняет результаты измерений. Данные никогда не будут потеряны.

▶ **Возможность расширения диапазона измерений**

Возможность расширения динамического диапазона системы лазерной центровки гарантирует, что независимо от степени измеряемой расцентровки, лазерная система будет справляться с задачей центровки. Системы статических детекторов не позволят измерить суммарную расцентровку на длинных или промежуточных валах независимо от заявленного размера плоскости детектора (см. последующие примечания).

▶ **Взаимозаменяемые статичные опоры**

Возможность менять статичные опоры обеспечивает инженеру максимальную гибкость и возможность измерений на опорах перемещаемой машины с креплением болтами без необходимости повторных измерений или сложных расчетов. Система позволяет отобразить все возможные альтернативы перемещения машины.

▶ **Ассортимент кронштейнов**

Широкий ассортимент кронштейнов означает, что измерительное оборудование можно легко и быстро установить даже на самые неудобные машины.

▶ **Допуски (TolCheck)**

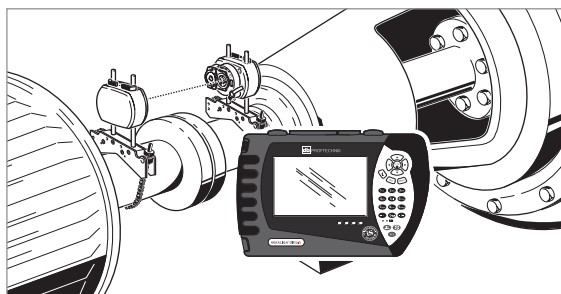
Встроенная проверка допусков центровки экономит время и усилия. Не надо тратить время на ненужные перемещения машины. Автоматическая проверка допуска показывает, когда будет достигнут идеальный или приемлемый уровень центровки.

▶ **Генерация отчетов непосредственно из блока**

Функция прямой отчетности означает ускоренный вывод отчетности на любом принтере с указанием в отчете серийного номера, даты, времени и имени оператора, что позволяет, в частности, обеспечить полное соответствие требованиям ISO 9000 в части прослеживаемости.

Основные принципы работы лазерных систем

По большому счету существуют два типа лазерных систем. В одних системах используется один луч, проецируемый на детектор или отражатель, который возвращает луч на лазерный детектор. В другом типе систем используются два лазера со встроенными детекторами. Однолазерная система предшествующей конструкции — это система, используемая исключительно PRUFTECHNIK. Все другие поставщики систем используют конструкцию систем с двумя лазерами.



Система с одним лазером, как показано выше, обладает рядом преимуществ, обеспечивающих повышение уровня универсальности и удобства использования.

Возможность расширения измерений

Наличие только одной нулевой точки отсчета лазера означает, что можно динамически расширить диапазон детекторов системы, чтобы измерить суммарную расцентровку; объяснение см. далее.

Возможность разделенной центровки

Один лазер обеспечивает центровку машин, у которых нет промежуточного вала или муфты, каждая машина может вращаться независимо. Это особенно полезно при использовании больших распорных муфт или гидравлических муфт, при центровке больших машин, таких как турбины, или если невозможно достаточно легко проверить одну или обе машины.

Технология одного кабеля

Для работы системы необходим только один кабель (или он вообще не нужен). Это особенно полезно для длинных промежуточных валов, таких как приводы градирни, где длинные кабели могут влиять на измерения центровки, запутываясь во время измерений.

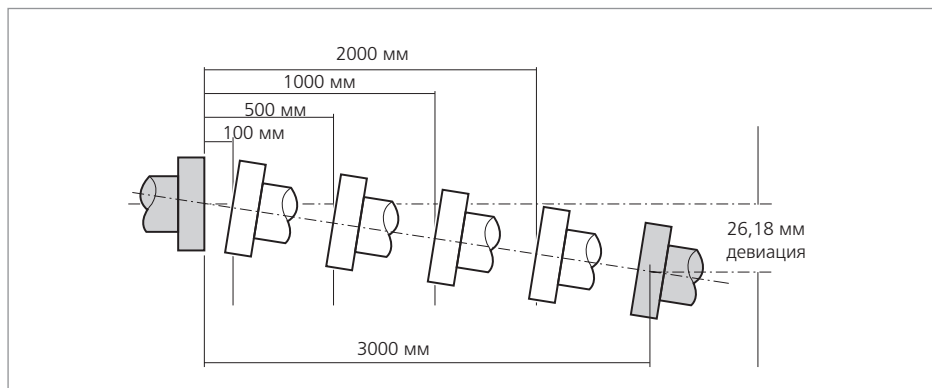
Всего один лазер для регулировки

Настройка системы для длинных промежуточных валов или больших машин выполняется намного проще, если надо отрегулировать только одно положение фиксированной опорной точки.

Пояснения по возможности расширения диапазона измерений

Почему полезно иметь возможность расширять диапазон плоскости детекторов для системы центровки валов. Может, проще установить детектор с большей площадью? Что ж, теоретически было бы полезно иметь плоскость статического детектора размером 500 мм. Однако такая система была бы непригодной для использования просто из-за ее размера и веса. Идеальный компромисс заключается в том, чтобы динамически расширять плоскость детектора по мере необходимости. Это позволяет обеспечить минимальный размер и вес системы и, следовательно, максимально увеличить возможность использования системы в труднодоступных местах.

Взяв в качестве примера привод градирни с муфтой промежуточного вала 3000 мм, можно увидеть, что смещение между приводным и приводимым валами может быть существенным даже при небольшом смещении угла перекоса между валами.



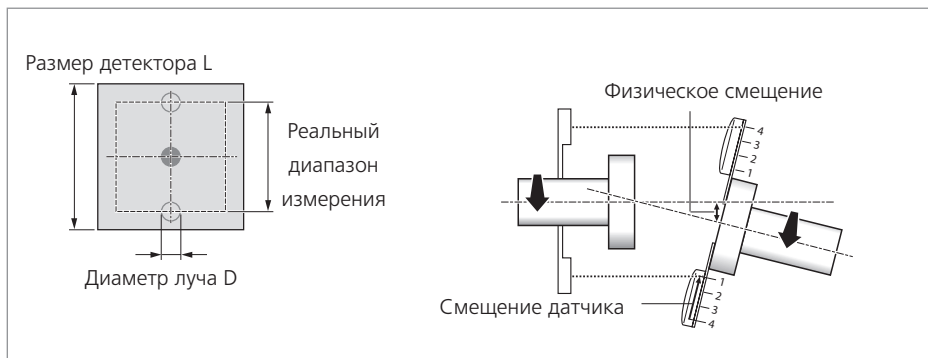
На этом рисунке показаны ограничения, налагаемые при использовании муфт длинных промежуточных валов.

Приведем простой пример. Установка муфты с расцентровкой по углу перекоса между муфтами, равным 0,5 градуса, означала бы, что использование простой короткой муфты длиной 100 мм приведет к смещению между осевыми линиями муфты, равному 0,87 мм. Такое смещение может быть легко измерено любой лазерной системой.

Если расстояние между торцами муфты увеличивается до 500 мм, смещение осевой линии становится равным 4,36 мм, что выходит за пределы диапазона измерения большинства статических лазерных детекторных систем. Теперь увеличим расстояние до 1000 мм. Смещение становится равным 8,72 мм. Поскольку распорная втулка муфты становится длиннее, увеличивается и смещение. При длине 3000 мм смещение достигает огромного значения 26,18 мм при угле всего лишь 0,5 градуса между осевыми линиями вала.

Такое большое смещение можно измерить только с помощью расширяемого диапазона детектора, поскольку для его размещения требуется область статического детектора около 60 мм. Необходимость использования такого большого детектора объясняется следующим образом.

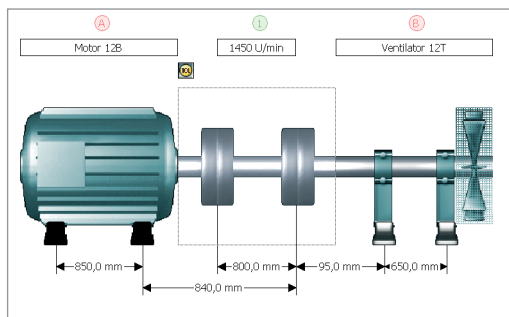
Рабочая область детектора меньше физической поверхности детектора. Например, если площадь детектора составляет 20 x 20 мм, а лазерный луч имеет диаметр 4,0 мм, то максимальный полезный диапазон измерений составляет 16 мм, как показано ниже.



Для измерения смещения диапазон системного детектора должен быть в два раза больше смещения. Как и в случае с циферблатным индикатором, лазерный датчик дважды измеряет физическое смещение двух валов, как показано ниже.

Чтобы измерить физическое смещение 2,0 мм, нам нужен диапазон измерения детектора 4,0 мм.

Здесь можно сказать, что возможности расширения диапазона измерения могут быть очень хорошими, если вы измеряете характеристики приводов градирни или других длинных промежуточных валов, однако почему так важна эта способность значительно расширять диапазон детекторов в том случае, когда максимальная длина промежуточного вала меньше 1 метра? Далее показан реальный пример преимущества этой возможности расширения диапазона детекторов. Были выполнены измерения привода двигателя/вентилятора, как показано ниже.



Длина распорной втулки муфты составила 800 мм.

Измеренное смещение и зазор для промежуточного вала длиной 100 мм

Вертикальное смещение = 0,00 Зазор 0,72 мм

Горизонтальное смещение = 0,00 Зазор 1,05 мм

Чтобы облегчить это измерение, необходимо, чтобы детекторы могли измерять смещение 8,40 мм. Для этого требуется диапазон детектора, равный 20,8 мм. Это получено из следующей формулы.

Измеренное смещение $\times 2$ + диаметр луча

$(8,4 \text{ мм} \times 2) + 4 \text{ мм} = 20,8 \text{ мм}$

В зависимости от конкретных требований, встречающихся в повседневных задачах центровки, возможность расширения диапазона системного детектора может стать одним из самых важных факторов при выборе измерительной системы. Независимо от выбранной системы лазерной центровки, действующая установка получит существенные преимущества, как рассмотрено в следующих практических примерах.

Практические примеры

Лазерная центровка вала снижает затраты на электроэнергию

Проект по определению степени, до которой расцентровка вала повлияла на энергопотребление установки, был выполнен студентом-выпускником на одной из крупных установок для химической переработки Великобритании. Исследование проводилось в течение шести недель в контролируемой среде, которая точно отражала нормальные рабочие условия на установке.

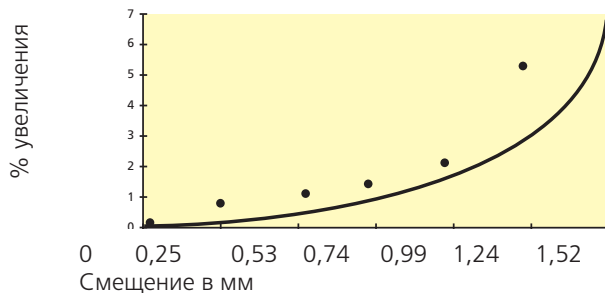
Для исследования использовалась насосная установка мощностью 7,5 кВт, установленная на резервной установке. Перед началом проекта насос и двигатель были перенесены в мастерскую, где были установлены новые подшипники, затем оба блока были подвергнуты балансировке, чтобы устранить любой внешний фактор, который может исказить результаты проекта. Плиты и домкратные болты были прикреплены к опорной плите двигателя, чтобы обеспечить точную регулировку состояния центровки. В системе был установлен насосный агрегат для циркуляции воды через замкнутый контур трубопровода с двигателем, работающим с частотой вращения 3000 об/мин (+/- 1 % из-за изменений нагрузки). Вначале насос и двигатель были установлены с центровкой, отрегулированной до значений зазора и смещения, равных 0,00, в вертикальном и горизонтальном направлениях. Система работала в этом состоянии в течение нескольких дней, значения потребляемого тока измерялись в распределительной коробке через каждые несколько часов. В течение периода пробного прогона центровка машин регулировалась и машина работала в каждом диапазоне расцентровки в течение заданного времени с регулярным измерением тока.

На объекте были установлены два основных типа муфты: стержневые и цилиндрические шинно-пневматические. Чтобы получить разумную картину потенциальной экономии, которая могла быть достигнута для установки, оба типа муфт были отрегулированы на одинаковую величину расцентровки и ток измерялся для обоих типов муфты.

Результаты исследования показаны на следующих графиках. Расцентровка со смещением повлияла на потребление энергии больше, чем угол перекоса. Расцентровка по углу перекоса повлияла на мощность, потребляемую при стержневых муфтах, больше, чем при цилиндрических шинно-пневматических муфтах. Компоненты смещения суммировались, независимо от того, каким было смещение — вертикальным или горизонтальным.

Влияние на энергопотребление

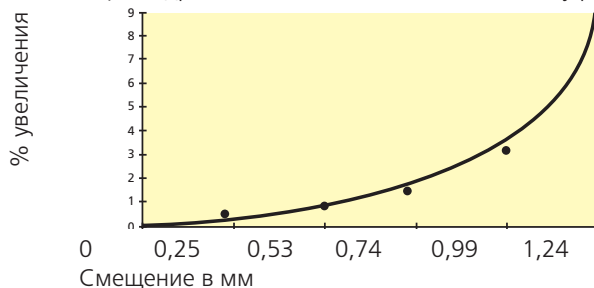
Стержневая муфта при 3000 об/мин



Смещение
%

0,03 мм	0,0
0,25 мм	0,7
0,53 мм	1,0
0,73 мм	1,3
0,99 мм	2,0
1,24 мм	5,2
1,24 мм	6,6

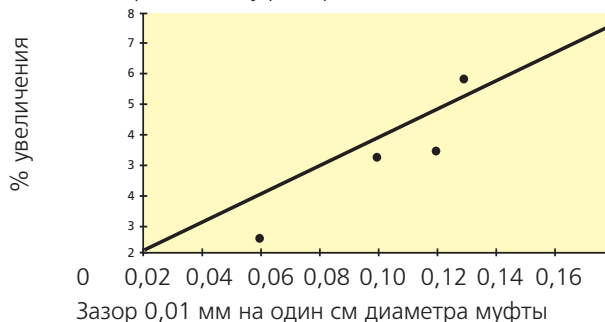
Цилиндрическая шинно-пневматическая муфта при 3000 об/мин



Смещение
%

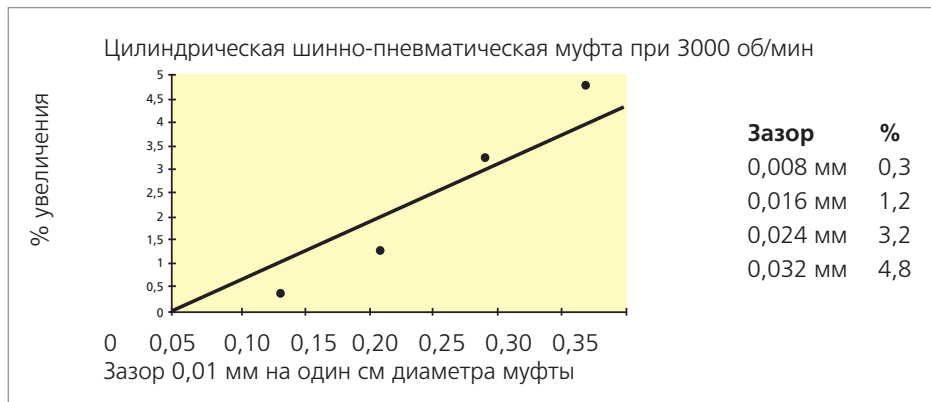
0,03 мм	0,0
0,25 мм	0,7
0,53 мм	1,0
0,74 мм	1,3
0,99 мм	2,8
1,24 мм	8,5

Стержневая муфта при 3000 об/мин



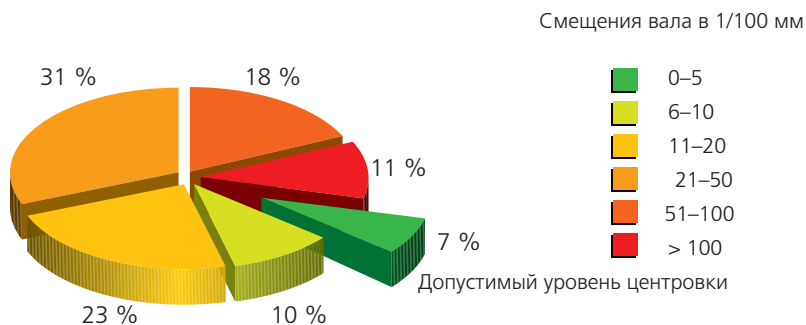
Зазор **%**

0,004 мм	0,3
0,008 мм	3,1
0,010 мм	3,3
0,011 мм	5,7
0,016 мм	7,8



По результатам выполненного проекта была дана общая для всего объекта рекомендация о том, что необходимо центровать машины с допуском смещения до 0,15 мм и допуском по углу перекоса до 0,05 мм на 100 мм диаметра муфты.

Чтобы оценить потенциальную экономию затрат, которая могла бы быть получена на основе этого нового стандарта объекта, были проведены измерения для случайной выборки машин, чтобы оценить степень расцентровки установки. Результаты этого исследования представлены на круговой диаграмме ниже.



Смещение вала на 1/100 мм в центре муфты для выборки из 100 машин, работающих с частотой вращения 3000 об/мин

Только 7 % измеренных машин работали в пределах рекомендуемого на объекте стандарта центровки. На основании круговой диаграммы было определено, что разумным показателем для расчета потенциальной экономии энергии на установке является представительное медиантное смещение, равное 0,35 мм. Учитывая, что потребляемая мощность вращающегося оборудования на установке находилась в диапазоне 30 мегаватт, реализация данной рекомендации могла бы привести к достижению следующей оценочной экономии энергии.

Предполагая, что тарифы на электроэнергию составляют 0,10 евро за кВт-ч и принимая консервативный % снижения мощности 0,75 %, получаем следующее.

$$\begin{aligned} 30\,000 \text{ кВт} * 0,75 \% * 0,10 \text{ Евро/кВтч} &= 22,5 \text{ евро в час или} \\ &= 197\,100 \text{ евро в год} \end{aligned}$$

Лазерная центровка вала повышает надежность насоса

На крупном ацетатном химическом заводе в Дербишире были достигнуты значительные улучшения показателей работы установки, ставшие результатом внедрения комплексной программы центровки и контроля насосов.

Процесс производства требует, чтобы материалы механически перемещались вокруг установки от одной технологической операции до другой. На этом заводе используется примерно 260 насосов. Поэтому очень важно, чтобы рабочая и резервная установки работали надежно и были постоянно доступны. Техническое обслуживание очень сильно походило на учение по тушению пожаров. Инженер-технолог в свое время убеждал руководство в необходимости более активного подхода к поддержанию производительности насоса, выполнению его технического обслуживания и мониторинга. Был разработан скоординированный план повышения производительности установки с использованием систем лазерной центровки PRUFTECHNIK и оборудования для мониторинга состояния.

За прошедшие годы был выполнен ремонт приблизительно 120 насосов в год с ежегодными затратами около 98 000 фунтов стерлингов. Расчетное среднее время между отказами (MTBF) этих насосов составляло 10 месяцев.

Используя комбинацию лазерной центровки недавно восстановленных машин и центровки уже установленных машин, когда позволяло время, а также регулярно контролируя состояние установки с полным осмотром всех установленных компонентов, таких как уплотнения, подшипники и прокладки, специалисты завода начали ощущать значительную экономию на обслуживании все основных насосных систем.

Хорошо зарекомендовавшая себя программа окупилась и позволила получить существенную прибыль. Надежность установки по MTBF превысила 46 месяцев, а количество текущих ремонтных операций насосов резко сократилось.

Теперь расчетная экономия превышает 80 000 фунтов стерлингов в год, а общая сумма сэкономленных средств с начала реализации программы составляет порядка 450 000 фунтов стерлингов.

Для достижения такой исключительной экономии на установке инженеры использовали комплексный план мероприятий. Ключевыми факторами стали следующие.

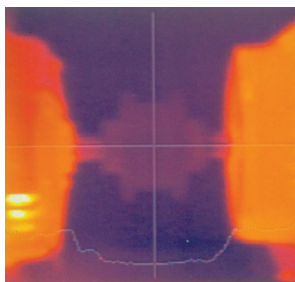
- ▶ Участие инженеров и менеджеров в программе
- ▶ Настойчивость
- ▶ Лазерная центровка
- ▶ Мониторинг состояния
- ▶ Обучение
- ▶ Анализ основных причин
- ▶ Тщательный выбор механических уплотнений
- ▶ Тщательный выбор подшипников
- ▶ Партнерские отношения с поставщиками
- ▶ Улучшенная конструкция и монтаж трубопроводов
- ▶ Продуманный выбор насоса
- ▶ Более точный выбор систем смазки

Лазерная центровка вала увеличивает срок службы подшипников и уплотнений

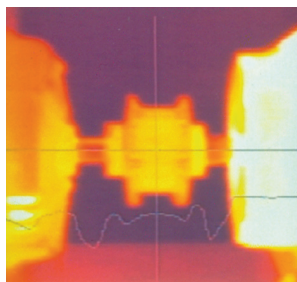
Исследование проводилось Институтом инфраспекции в США, чтобы оценить влияние расцентровки на основные элементы машины, такие как подшипники, уплотнения и муфты.

При проведении серии испытаний в комплекте насоса-двигателя была задана расцентровка. Для каждого нового интервала расцентровки были сделаны термографические снимки, чтобы определить степень повышения температуры на основных компонентах.

Испытания проводились в широком спектре типов упругих муфт. Все, без исключения, муфты, подшипники и корпуса машин (и следовательно, уплотнения) показали значительное повышение температуры. На графике ниже показано влияние расцентровки на компоненты, когда машина была отцентрована на $\pm 0,05$ мм, и потом, когда значение расцентровки было увеличено до $+0,5$ мм.



Отцентровано с точностью
0,05 мм



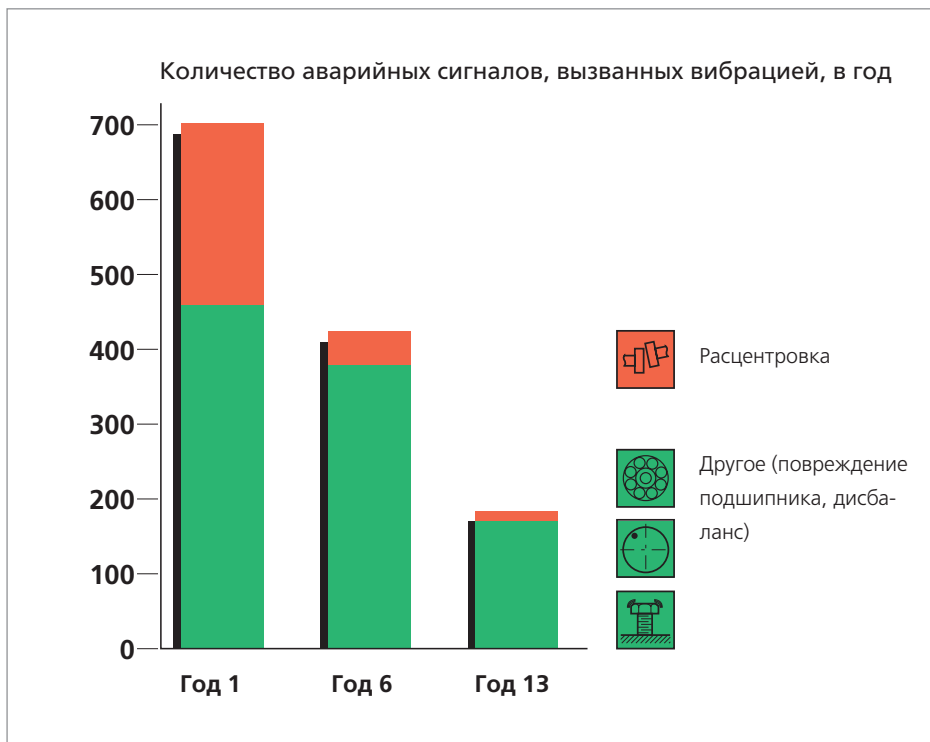
Расцентровано до 0,5 мм

Помимо нагрева самого упругого элемента, повышение температуры наблюдалось на самих машинах, особенно вокруг корпусов подшипников. Ни подшипники, ни уплотнения не предназначены для работы при повышенных температурах (вызванных расцентровкой) в течение длительного времени. Неизбежным результатом их эксплуатации в этих условиях является преждевременный отказ и сокращение срока службы машины.

Лазерная центровка вала снижает вибрацию

Крупный нефтеперерабатывающий завод в Великобритании использовал систему лазерной центровки валов в качестве стандартной технологии техобслуживания всех соединенных муфтами вращающихся машин. Предпочтительными системами стали системы OPTALIGN®, а позднее — ROTALIGN® компании PRUFTECHNIK. Они также контролировали частоту возникновения аварийных сигналов по вибрации и то, как использование лазерной центровки валов могло бы уменьшить эти проблемы, если это вообще возможно. Аварийные сигналы были классифицированы на проблемы, вызванные «расцентровкой», и «другие» проблемы, такие как повреждение подшипника, дисбаланс и механическое ослабление.

График, предоставленный компанией, четко показывает, что система обеспечила существенное сокращение аварийных сигналов, связанных с неисправностями, а все проблемы, связанные с центровкой, были устранены.



Системы лазерной центровки PRUFTECHNIK

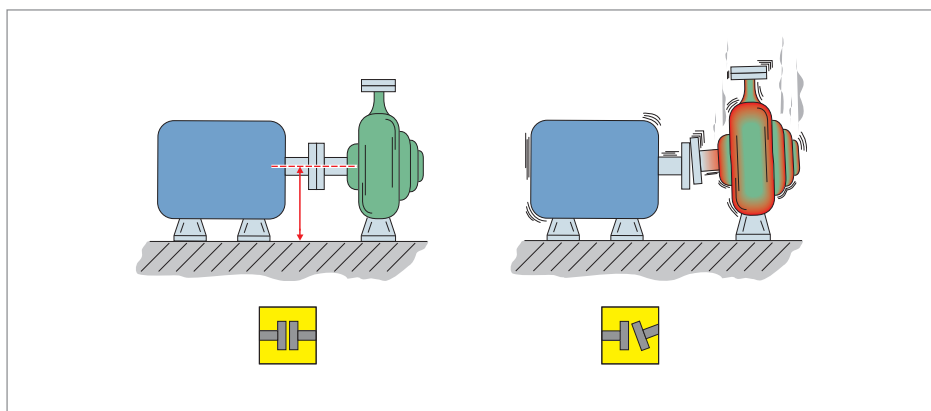
Система ROTALIGN® touch представляет собой действительно универсальную систему центровки лазерных валов, разработанную на основе принципа простоты в эксплуатации. В состав системы входит большое количество инновационных функций, включая следующие:

- ▶ Емкостный сенсорный экран, аналогичный экрану планшета, с 3D-дисплеем
- ▶ Сверхпрочный экран с усиленным стеклом и жестким корпусом
- ▶ Высокое качество измерений с функцией intelliSWEEP
- ▶ Функция активного сдвига с акустическим вспомогательным механизмом
- ▶ Голосовое управление для освобождения рук оператора
- ▶ Встроенная возможность подключения мобильных устройств: RFID, Wi-Fi, Bluetooth — и встроенная камера
- ▶ Бесплатное программное обеспечение для центровки и связи с облачным хранилищем данных
- ▶ Функция Live Trend для постоянного отслеживания относительных позиционных изменений машины
- ▶ Выборочная проверка уровня вибраций для получения общих значений
- ▶ Режимы измерения intelliPASS и intelliPOINT для не соединенных муфтами валов



ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ МАШИН

В большинстве случаев, описанных в этом руководстве, рассматривается центровка вращающихся машин в холодном состоянии. Однако для более крупных машин и оборудования, работающего при воздействии повышенных температур на один компонент машины, необходимо учитывать влияние расширения (или сжатия) на состояние центровки машин. Точная центровка машины в холодных условиях не имеет смысла, если это состояние центровки изменится при переходе в нормальное рабочее состояние машины.



Существует несколько способов установления конечной центровки или рабочего состояния центровки.

- ▶ Производители машин должны предоставлять информацию о тепловом смещении.
- ▶ Расчеты в британских единицах, основанные на коэффициенте теплового расширения для конкретных материалов на единицу длины высоты осевой линии на градус теплового изменения (см. следующую страницу).
- ▶ Оперативное измерение изменения состояния центровки при переходе из холодного в горячее состояние с использованием контактных или бесконтактных измерительных приборов.

Оценка или расчет эффективного изменения положения центровки представляет определенные трудности. Простые вычисления теплового расширения в сложных системах машин, таких как компрессоры, включающих большое количество компонен-

тов машины, каждый из которых имеет свой температурный градиент, превращаются в очень сложную задачу. Как правило, в таких случаях необходимо выполнить оперативное измерение характеристик компонентов машины.

Идеальным инструментом для выполнения таких операций являются лазерные системы, такие как система PERMALIGN® компании PRUFTECHNIK. Такие системы как PERMALIGN®, должны быть рассчитаны на длительную работу в сложных условиях. Зачастую сам процесс монтажа оборудования на турбине или компрессоре, работающем при температуре более 300 °С, означает, что измерительную систему необходимо охлаждать во избежание повреждения или неточных показаний теплового расширения.

Однако тепловое расширение не является единственной причиной изменения положения машины. На точность конечного результата могут влиять различные элементы, включая следующие.

- ▶ Тепловое расширение опор подшипников
- ▶ Изменения радиальных или осевых сил
- ▶ Изменения толщины масляной пленки на подшипниках
- ▶ Изменения в фундаменте или опорных плитах основания
- ▶ Изменения усилий, создаваемых трубопроводами

Расчет теплового расширения

Если направление и степень расширения известны, то машины могут быть специально расцентрованы так, чтобы эффект расширения по месту во время нормальной работы привел к получению хорошего состояния центровки.

Системы лазерной центровки PRUFTECHNIK используют особую функцию, разработанную специально для включения таких целевых значений центровки. Как правило, наиболее легкодоступные целевые спецификации для холодной центровки можно получить от производителей машин. Если эта информация недоступна, то выполнение следующих расчетов позволит определить характеристики теплового расширения.

$$dL = L * a * dT$$

Где

dL = тепловое расширение

L = высота по осевой линии до основания машины

a = коэффициент теплового расширения материала

dT = изменение температуры окружающей среды

Пример

- ▶ Насос с жидкостью при температуре 150 °C
- ▶ Высота от основания до центра 700 мм
- ▶ Температура окружающей среды 10 °C
- ▶ a (чугун) = 0,0000059

$$dL = L * a * dT$$

$$\begin{aligned} dL &= 700 \text{ м} * 0,0000059 * (150 - 10) \\ &= 700 \text{ мм} * 0,0000059 * 140 = \mathbf{0,578 \text{ мм}} \end{aligned}$$

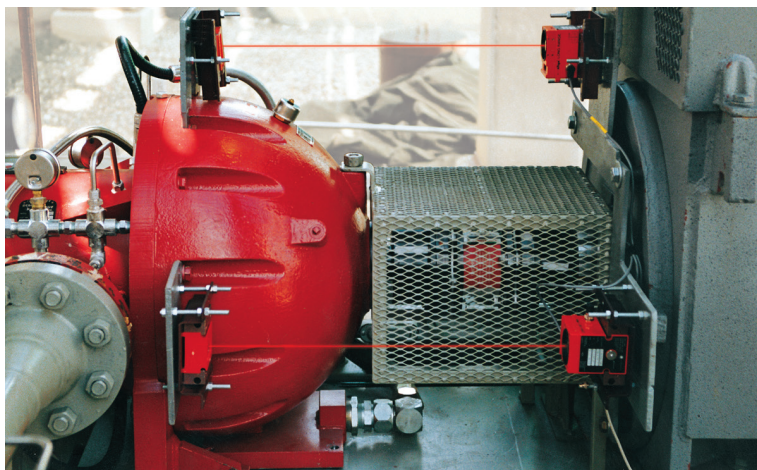
Некоторые усовершенствованные системы лазерной центровки, такие как ROTALIGN® Ultra, могут выполнить эти расчеты для вас.

Системы мониторинга центровки PRUFTECHNIK

Система PERMALIGN® является идеальной системой, которая обеспечивает постоянный или временный мониторинг изменений положений оборудования. Она измеряет и контролирует, постоянно и в режиме реального времени, изменения центровки вращающихся машин во время работы. Ее можно использовать для постоянного мониторинга или в течение необходимого времени, чтобы определить изменения положения при переходе из холодного состояния в горячее или наоборот.

Все четыре параметра центровки — вертикальное и горизонтальное смещение, вертикальный и горизонтальный угол перекоса — контролируются одновременно с использованием двух мониторов.

- ▶ Лазерная система мониторинга изменения положения с графическим дисплеем.
- ▶ Влияние изменений температуры сведено к минимуму за счет охлаждения измерительных компонентов.
- ▶ Воздействие вибраций минимизировано за счет корректировки времени выборки.
- ▶ Контроль многоэлементных валопроводов.
- ▶ Приложение программного обеспечения для мониторинга состояния в режиме реального времени (ALIGNMENT CENTER).
- ▶ Возможна поставка искробезопасной опции.



ЦЕНТРОВКА ШКИВОВ

Использование гибких ременных приводов является характерным для значительной части всех областей применения в области промышленной передачи энергии, особенно если частота вращения привода и ведомых валов различна или если между валами должно быть большое расстояние. Несомненно, существует ряд конструктивных факторов, которые исключают использование гибких ремней. Но там, где это уместно, такие приводы предлагают эффективное и экономичное решение, обладающее некоторыми полезными преимуществами по сравнению с другими средствами передачи энергии.

К их преимуществам относятся следующие:

- ▶ Общая экономичность
- ▶ Чистота
- ▶ Отсутствие необходимости в смазке
- ▶ Низкие затраты на техобслуживание
- ▶ Простая установка
- ▶ Демпфирование ударных нагрузок
- ▶ Возможность использования для передачи энергии с переменной скоростью между валами, разнесенными на большое расстояние

Мощность, передаваемая ремнем во время работы, воздействует на обод шкива, поэтому ремень в системе ременной передачи через шкив должен быть достаточно плотным, чтобы предотвратить «скольжение» во время работы. Силы, действующие во время работы, неравномерны по всей длине ремня. Всегда существует повышенное натяжение с ведущей и ослабление с ведомой стороны. Разница между этими натяжениями часто упоминается производителями ременных систем в качестве эффективного или чистого натяжения. Это эффективное тяговое усилие приложено к ободу шкива и является силой, выполняющей работу.

Конструкция систем на основе шкивов и выбор правильной конструкции и применения ременной передачи представляет достаточно сложную задачу. Свидетельством тому служит количество и разнообразие типов ремней. Производители ремней и шкивов не пытаются выпускать широкий ассортимент различных типов и стилей, просто чтобы отличаться от своих конкурентов. Клиновидные, плоские, клиновые и зубчатые ремни имеют свои конкретные области и критерии применения. В каждом

разделе конструкции представлено множество различных конфигураций, сечений и рабочих критериев.

Мы не стремимся кратко рассмотреть в этом разделе конструкцию или порядок выбора ремня. В библиографии, приведенной в конце этого документа, представлен ряд полезных руководств по выбору и конструкции ремней. Тем не менее полезно обратить внимание на следующие основные критерии проектирования.

- ▶ Максимальное расстояние между шкивами должно быть примерно в 15 раз больше, чем шаг самого маленького шкива; кроме того, оно не должно превышать 20-кратного шага этого шкива. Если в системе присутствуют расстояния, превышающие этот показатель, необходимо строго контролировать натяжение ремня, поскольку небольшое растяжение вызывает значительное падение натяжения ремня и приводит к проскальзыванию и неэффективности передачи энергии.

Во время работы гибкий ремень испытывает три типа натяжения во время вращения вокруг шкива.

- ▶ Рабочее натяжение (сторона сильного натяжения — сторона слабого натяжения)
- ▶ Растяжение при изгибе
- ▶ Центробежное натяжение

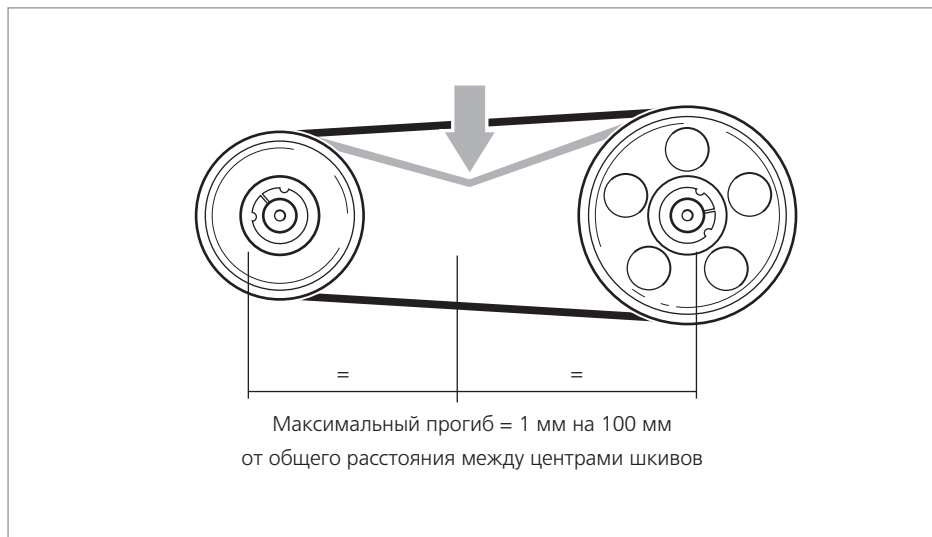
Ремни предназначены для выдерживания этих рабочих состояний (при условии что предварительный выбор ремня соответствует рабочим критериям). Срок службы ремня будет соблюден и даже превышен при условии, что в течение срока службы на ремень не будут действовать никакие другие силы, помимо вышеуказанных. Силы, такие как расцентровка и ослабление или чрезмерное натяжение ремня, разрушают гибкие ременные приводы. Полезный срок службы может уменьшиться на 80 % за счет плохой центровки шкивов. Помимо износа ремня, шкивы, подшипники и уплотнения могут получить повреждения при невыполнении основных требований к установке.

Натяжение ремня

Требуемое натяжение вновь установленных ремней практически всегда определяется производителями ремней. Требования этой спецификации должны тщательно соблюдаться. Если спецификация отсутствует, применяйте следующий способ определения натяжения ремня.

Сила натяжения =

расстояние (см) между осями привода и ведомыми валами x 1,0 мм



После натяжения и центровки перезапустите машину. Через 48 часов работы необходимо перепроверить натяжение новых ремней и повторно их натянуть, чтобы устранить любое отклонение в середине пролета, превышающее требования спецификации по натяжению.

Для измерения натяжения ремня рекомендуется использовать специально разработанное устройство, чтобы обеспечить точный и повторяющийся результат натяжения ремня. Периодическая проверка каждого ременного привода позволяет быстро идентифицировать любые приводы, которые необходимо натянуть (или ослабить) до того, как повреждения ремней и других компонентов приведут к преждевременному отказу.

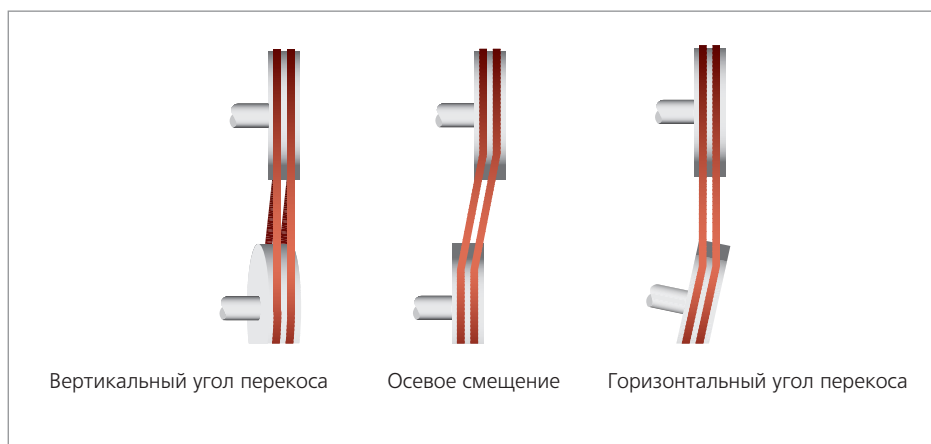
Центровка шкива

Самой распространенной и пагубной ошибкой установки, возникающей на ременных приводах, является расцентровка приводных и ведомых шкивов. Обычно она возникает в результате небрежности со стороны установщика. Чаще всего это связано с отсутствием подходящих инструментов для выполнения требуемой центровки. В течение многих лет единственными доступными инструментами для выполнения этой работы в лучшем случае были натянутый провод или поверочная линейка.

Оба метода полностью зависят от остроты зрения установщика, чтобы обеспечить правильность центровки. Ни один из методов не предусматривает каких-либо измерений. Методики основаны на регулировке ведомого шкива установщиком до тех пор, пока торцы или пазы ведомого шкива не коснутся поверхности поверочной линейки или натянутого провода. Затем ведомый шкив поворачивается на пол-оборота, проверяется и регулируется. Измерение повторяется до тех пор, пока все шкивы не будут визуально выставлены. Невозможно измерить угол перекоса или неточную установку эталонной линии. Система предназначена исключительно для оценки центровки двух шкивов.

Типы расцентровки шкивов

Существуют три основных параметра, которые характеризуют расцентровку шкива. Это **вертикальный и горизонтальный угол перекоса**, а также **осевое смещение**. Как правило, такие состояния встречаются в любых комбинациях состояния центровки.



Биение шкива

Помимо правильной центровки шкивов, необходимо измерить и скорректировать ошибки биения шкива. Два типа биения, обода (радиальное) и торца (осевое), необходимо корректировать до тех пор, пока они не достигнут допусков, при которых выполняется окончательная центровка шкивов. Если биение не устранить, то результатом его действия может стать ослабление ремней в одном положении, а затем их натяжение в противоположном положении. Если не устранить такое непрерывное хлопанье, это может привести к быстрому износу ремней и подшипников.

Допуск по радиальному биению или биению обода на высокооборотных шкивах (1500 об/мин и выше) в среднем не должен превышать общие показания индикатора (0,12 мм) (0,005 дюйма) и может быть увеличен до 0,24 мм (0,01 дюйма) для более медленных шкивов.

Допуск по осевому или торцевому биению не должен превышать 0,05 мм на 100 мм (0,0005 на дюйм) диаметра шкива для высокооборотных шкивов, он может быть увеличен до 0,1 мм на 100 мм (0,001 на дюйм) диаметра шкива для более медленных шкивов.

Убедитесь в том, что смещение от монтажной поверхности шкива до паза является одинаковым для обоих шкивов.

По возможности следует придерживаться точных рекомендаций производителя шкива или машины. Начните с проверки радиального биения. Если оно находится вне допустимых пределов, проверьте наличие биения вала. Если биение вала является чрезмерным, он может согнуться, и его следует заменить до очередной проверки радиального биения шкива. Если биение вала не обнаружено, замените вместо вала шкив. Если шкив установлен на конической втулке вала, осмотрите и очистите втулку как внутри, так и снаружи, чтобы обеспечить правильную посадку.

Теперь проверьте наличие биения торца (осевое) и при необходимости устраните его, переместив шкив на его валу. Если биение в пределах допуска, продолжите установку новых ремней.

Установка ремня привода

- ▶ Очистите шкивы от всех посторонних загрязнений, используя жесткую, но не проволочную щетку, поскольку это может повредить поверхность стенок пазов.
- ▶ Используйте профильные шаблоны проверки по принципу «да/нет», которые можно получить у производителя ремня, чтобы обеспечить приемлемое состояние шкива для установки новых ремней.
- ▶ Замените любые шкивы с изношенными, сколотыми или потрескавшимися поверхностями паза.
- ▶ Установите новые ремни на шкивы таким образом, чтобы концы всех ремней со слабым натяжением находились на одной стороне в верхней или нижней части привода.

НИ ПРИ КАКИХ ОБСТОЯТЕЛЬСТВАХ не устанавливайте ремни на шкивы с помощью рычага, прилагая значительные усилия. Ремни следует устанавливать только вручную.

- ▶ Снимите двигатель, чтобы выполнить эту посадку без чрезмерного давления.
- ▶ При замене ремней для нескольких ленточных приводов, даже если изношен только один ремень, необходимо заменить все ремни одновременно.
- ▶ Допускается совместное использование ремней только одного производителя, предпочтительно в виде заводского набора.

После замены ремней стоит осмотреть замененные ремни на наличие заметных дефектов, таких как растрескивание или засаливание. Состояние ремня является хорошим идентификатором для различных типов проблем установки. Неравномерный износ или растрескивание на сторонах ремня является надежным признаком расцентровки. Засаливание на контактной поверхности ремней указывает на проскальзывание и, следовательно, слабое натяжение ремня.

Проверка неплотно прилегающей опоры

Установив ремни и расположив приводные и ведомые устройства в их правильном положении, полезно проверить наличие состояния неплотно прилегающей опоры подвижной машины (как правило, со стороны привода). Необнаруженная неплотно прилегающая опора может привести к деформации рамы машины при креплении болтами и вызвать повреждение подшипников, уплотнений и вибрацию на подшипниках, превышающую допустимую.

Чтобы проверить наличие неплотно прилегающей опоры, используйте шупы под каждой опорой машины по очереди или циферблатный индикатор, установленный

на магнитном основании. Ослабьте каждую опору по очереди; измерьте величину любого подъема ослабленной опоры и запишите ее. Затяните опору и перейдите к следующей опоре.

Определив тип неплотно прилегающей опоры (если есть), установите необходимое количество регулировочных прокладок и повторите проверку для каждой опоры. В качестве ориентира результат измерения неплотно прилегающей опоры не должен превышать 0,05 мм (0,002 дюйма).

Допуски центровки

После завершения проверки неплотно прилегающей опоры привод готов к центровке. Независимо от того, какая система используется для этого — натянутая проволока, поверочная линейка или лазерная система (краткое описание этого типа центровки см. далее), — центровка должно быть максимально точной.

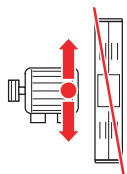
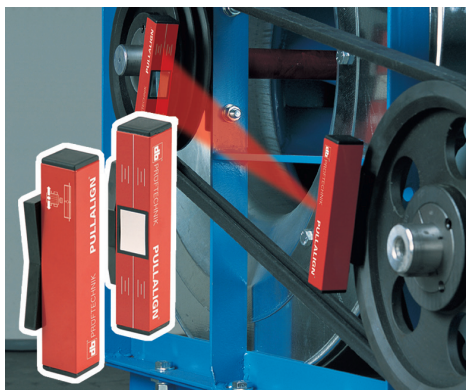
Номинальный рекомендуемый допуск для ременных приводов составляет **0,5 градуса**. Это значение определяется большинством производителей ремней и шкивов. Возможно обеспечение более точных допусков, если тщательно соблюдать процедуру центровки. В таблице ниже представлено преобразование допуска из градусов в смещения в мм на 100 мм и в тысячные доли дюйма на дюйм.

Таблица преобразования допусков		
Расцентровка по углу смещения	Смещение мм/100 мм	Смещение тыс/дюйм
0,1°	0,18	0,00175
0,2°	0,35	0,00349
0,3°	0,52	0,00524
0,4°	0,70	0,00698
0,5°	0,87	0,00873
0,6°	1,05	0,01047
0,7°	1,22	0,01222
0,8°	1,40	0,01396
0,9°	1,57	0,01571
1,0°	1,74	0,01745

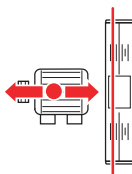
Примечание. Значения от 0,1 до 0,5° попадают в рекомендуемые допуски.

Система центровки ременного шкива PRUFTECHNIK

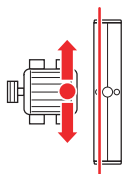
Благодаря простоте использования с участием лишь одного оператора, устройство PULLALIGN® является универсальным инструментом для выполнения работ по центровке. Его универсальная конструкция и сильные магниты позволяют монтировать устройства практически на любую поверхность шкива или венцовые шестерни.



Вертикальный
угол перекоса



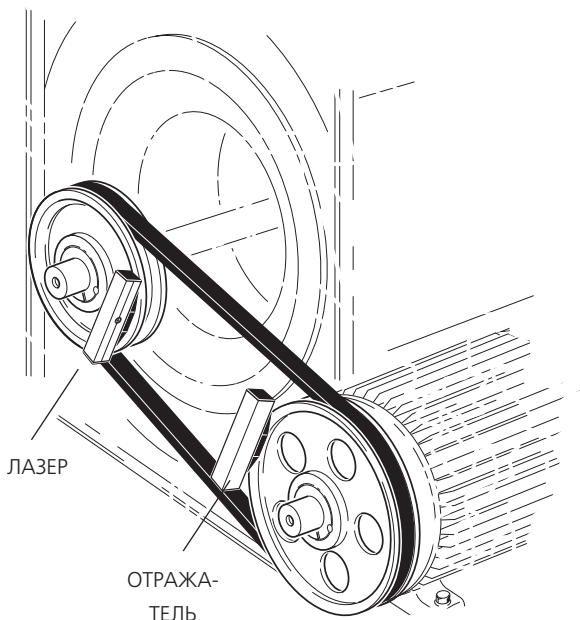
Осевое
смещение



Горизонтальный
угол перекоса

- ▶ Отображает смещение и угловое смещение.
- ▶ Повышенная точность и эффективность по сравнению с методом проверки натянутым проводом и поверочной линейкой.
- ▶ Установка выполняется быстро и не требует обучения.
- ▶ Увеличивает срок службы ремня и шкива.
- ▶ Уменьшает вибрацию и шум от ремня.
- ▶ Сокращает время простоя, необходимые трудовые ресурсы и затраты на электроэнергию.

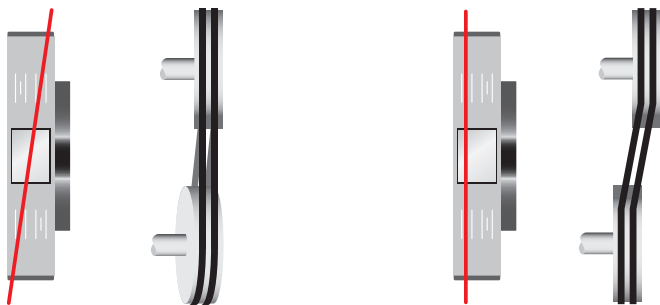
Устройство PULLALIGN® состоит из двух компактных измерительных устройств, лазерной и отражательной систем, с магнитным креплением, позволяющим устанавливать его на торцы шкива. На поверхности каждого устройства промаркирована серия градуированных линий, чтобы обеспечить точную регулировку перемещаемой машины, которая корректирует вертикальное и горизонтальное угловое и осевое смещение.



Лазерный датчик передает лазерную линию на отражатель, установленный на противоположном шкиве (лазерный передатчик должен быть установлен на неподвижной машине). В зависимости от состояния центровки лазерная линия будет четко показана на отражателе и возвращена на лазерный передатчик. Отражатель определяет любой фактический вертикальный угол перекоса и одновременно показывает величину осевого смещения. Лазерный датчик показывает горизонтальное угловое состояние привода.

На диаграммах на следующей странице показаны типичные примеры состояния расцентровки.

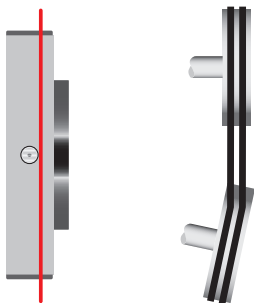
Лазерная линия на отражателе



Наблюдаемый вертикальный угол перекоса

Наблюдаемое осевое смещение

Лазерная линия на лазерном блоке



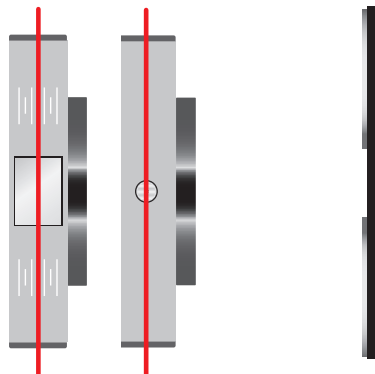
Наблюдаемый горизонтальный угол перекоса

Процедура коррекции

- ▶ Скорректируйте вертикальный угол перекоса, устанавливая прокладки на перемещаемой машине. Зачастую это может быть достигнуто путем добавления (или снятия) прокладок на задних опорах перемещаемой машины. Все коррекции можно просмотреть на отражателе во время регулировки.
- ▶ Скорректируйте горизонтальный угол перекоса путем регулировки перемещаемой машины в поперечном направлении. Эту коррекцию можно просмотреть на лазерном передатчике во время регулировки.
- ▶ Откорректируйте смещение, регулируя перемещаемую машину в осевом направлении. Эту коррекцию можно наблюдать на блоке отражателя во время регулировки.

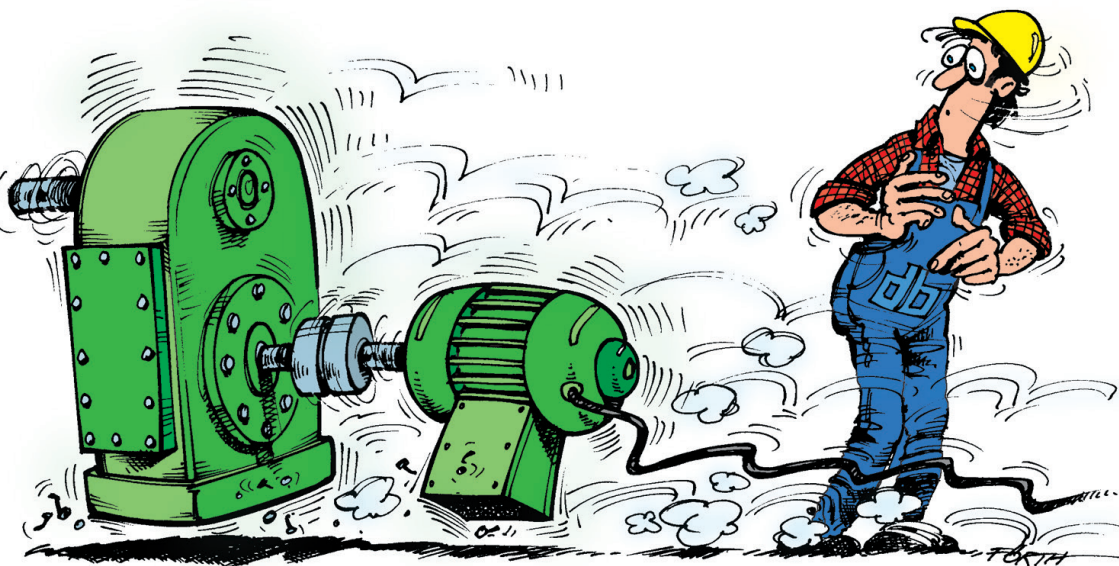
Выполнение описанных выше трех шагов обеспечивает быструю центровку шкивов. Когда вы убедитесь в правильности центровки, натяните ремни надлежащим образом в соответствии с допусками производителя. Во время натяжения ремня оставьте систему PULLALIGN® на месте, чтобы обеспечить четкое представление о любых изменениях состояния центровки привода. Если регулировка натяжения привела к изменению состояния центровки, выполните необходимые регулировки в соответствии с описанием шагов вверху.

Лазерная линия на отражателе и лазерном блоке после коррекции центровки



Раздел 2

Анализ вибрации



Мониторинг состояния

Большинство людей, участвующих в техническом обслуживании установок, знают о мониторинге состояния (СМ). По определению СМ означает периодическую проверку условий работы машины и при необходимости реагирование на любые изменения состояния машины. СМ может проводиться во время выполнения ряда «функций техобслуживания». К наиболее популярным методам относятся визуальный осмотр, анализ продуктов износа, термографический анализ и анализ вибрации. В этом руководстве описан порядок использования анализа вибрации для измерения, мониторинга и анализа состояния машины.

Позже будут рассмотрены методы измерения вибраций и объяснены некоторые основные параметры и термины, которые применяются для измерения состояния машины. Для начала полезно коротко перечислить те преимущества, которые позволяет получить режим СМ для эксплуатируемой установки.

В 1988 году DTI сообщила, что компании, которые внедрили программу СМ на своих заводах, тратят в среднем на 25 % меньше на техническое обслуживание завода, чем те компании, у которых нет программы СМ (отчет DFI Boardroom о техническом обслуживании в Британской промышленности, 1988).

Учитывая, что британский завод среднего размера будет тратить 250 000 фунтов стерлингов в год на техническое обслуживание, экономия в 62 000 фунтов стерлингов плюс дополнительная экономия на производстве, электроэнергии и вспомогательных мероприятиях представляет собой очень хороший возврат инвестиций в программу СМ.

Если выгода от инвестиций в программу СМ настолько высока, почему не все заводы применяют эту систему? Чаще всего ответ на этот вопрос заключается в недостаточном понимании того, что требуется для реализации СМ на заводе, и в опасениях по поводу того, что стоимость внедрения и запуска системы будет больше, чем возврат стоимости, которую сможет реализовать система.

По сути, мониторинг состояния означает, что все машины на заводе проходят «регулярную проверку состояния». Обычно это реализовано в виде периодических измерений вибрации. Эти измерения сравниваются со стандартным или «известным» рабочим состоянием. В случае вибрации этот стандарт обычно является нормой ISO

или в некоторых случаях стандартом завода или рекомендациями производителей. Проведя сравнение между текущим и «стандартным или известным» состоянием, можно оценить, изменилось ли рабочее состояние машины. В зависимости от степени изменения можно дополнительно исследовать состояние машины или контролировать его чаще, чтобы обнаружить дальнейшие изменения. Ключевым инструментом в этой концепции СМ является определение тенденции собранных данных и реагирование на изменения тенденции. Цель состоит в том, чтобы выполнить работы по предотвращению аварийных ситуаций до того момента, как в машине произойдет катастрофический отказ.

Составные части системы СМ

После определения основного принципа режима СМ следует вопрос: высока ли стоимость запуска и поддержания программы? Ответ на этот вопрос — не очень значительная. Система может стоить всего несколько сотен фунтов за простой переносной продукт по принципу «выбрать и активировать», который стоит на машине и обеспечивает считывание степени вибрации, обычно среднеквадратичного значения. Это показание может быть записано вручную в таблицу. Затем результаты измерений сравниваются с течением времени для определения изменения результатов измерений рабочего состояния.



VIBSCANNER — популярная и недорогая портативная система СМ

Этот процесс включает сбор данных о состоянии машины и их ввод в программу ПК для автоматического определения и составления трендов данных о состоянии машины. Дальнейшие разработки позволяют выполнить анализ состояния машины путем алгоритмических расчетов (анализ на основе быстрого преобразования Фурье (FFT)) для определения конкретных дефектов машины. От портативных систем можно перейти к встроенным системам мониторинга, которые обеспечивают круглосуточное измерение и выдачу аварийных сигналов о состоянии машины.

По мере расширения сложности системы и возможностей анализа возрастает и стоимость системы. Как правило, уровень системы мониторинга, требуемый на заводе, определяется критичностью машин для работы завода. Однако из этого не следует, что компания, которая расходует 20 000 фунтов стерлингов на систему СМ, получит в 20 раз лучшую систему или в 20 раз больше результатов СМ, чем компания, которая тратит 1000 фунтов стерлингов.

Выберите ту систему СМ, которая наиболее удобна для вас. Сопоставьте систему с заводскими условиями и имеющимися навыками. Не выбирайте самый дорогой вариант системы на основе слов продавца о том, что это лучший вариант. Это может быть так, но он может не подходить для данного завода.

Если на заводе есть много критически важных машин, то, возможно, следует рассмотреть возможность мониторинга в режиме онлайн. При небольших размерах обрабатывающего завода начните с простого. Достаточно обычного визуального осмотра и снятия простых показаний общей вибрации. Если есть сомнения, независимо от размера завода, начните с простого. Если внедренная система способна расширяться и может наращиваться по мере роста требований СМ, то вам не нужно беспокоиться о более сложных возможностях анализа.

Тренд собранных данных — большинство систем (даже самых дорогих) выполняет построение трендов данных и их анализ только при возникновении проблемы. При необходимости привлекайте для аналитической экспертизы сторонних специалистов.

Внедрение программы СМ

Внедрение режима СМ прежде всего означает, что вы должны знать оборудование своего завода. Важно иметь базовое понимание того, как работают машины и как они должны работать. Это не означает необходимость значительных первоначальных инвестиций в датчики, экспертный анализ или высококвалифицированный персонал.

Зачастую информация из стандартов ISO, от поставщиков машин и из опыта эксплуатации оборудования в прошлом может стать источником данных, необходимых для первоначального определения того, как **должно** работать оборудование завода. **Фактический режим** работы оборудования завода может быть установлен путем использования комбинации методов, включая измерение вибрации, термографию, анализ масла и опыт работы оператора установки.

Одним из ключей к эффективному использованию режима CM является инвестиция, которую руководство предприятия готово сделать для обеспечения того, чтобы операторы получили опыт в использовании систем, которые они применяют, и могли пользоваться возможностями постоянного обучения для поддержания навыков оператора.

Внедрение и поддержание режима CM не обязательно должно выполняться в течение полного рабочего дня, для этого требуется реализация обязательных и регулярных процедур мониторинга с применением некоторой формы сбора, хранения и регулярного обзора данных.

Окупаемость инвестиций в CM

Наиболее эффективной профилактикой выхода машины из строя является сочетание регулярного сбора данных, анализа трендов, анализа основных причин и осведомленности оператора машины. Внимание к изменениям в рабочем состоянии, утечке через уплотнения, повышению уровня общей вибрации, изменению рабочей температуры машины или даже увеличению рабочего шума позволит оператору или инженеру узнать о потенциальной неисправности. Это не значит, что вы должны остановить установку. Это должно означать только то, что вы должны провести дополнительные исследования, устранить изменения переменных процессов, а затем увеличить частоту мониторинга машины, чтобы установить скорость изменения рабочего состояния. Быстрое нарастание потребует немедленного выполнения работ по предотвращению аварийных ситуаций до наступления выхода оборудования завода из строя; медленное нарастание означает, что вы можете запланировать удобное время для выполнения работ по предотвращению аварийных ситуаций в будущем. Это является одним из основных преимуществ внедрения CM для вашей установки.

- ▶ Это позволит вашим инженерам запланировать отключение установки, заказать запасные части и привлечь необходимый персонал для выполнения работ по отключению.

Каждый, кто участвовал в процессе технического обслуживания или производства на обрабатывающем предприятии, не понаслышке знает о «внезапном» отказе оборудования завода. Например, заедает подшипник насоса. Катастрофический результат заключается в разрушении механического уплотнения, утечке смазки и разрушении вала или муфты. Если вы можете уменьшить или исключить такие «внезапные» неисправности и выполнить работы по предотвращению аварийных ситуаций до наступления катастрофического сбоя, то вам необходимо всего лишь заменить неисправный компонент (в данном случае подшипник).

- ▶ СМ поможет предотвратить побочные повреждения оборудования предприятия. За счет этого стоимость замены деталей будет снижаться, а время на выполнение ремонтных работ — сокращаться, как и время возврата оборудования в эксплуатацию.
- ▶ Можно сократить затраты на рабочую силу, сосредоточив трудовые ресурсы на проблемных областях.
- ▶ Проверенная процедура СМ позволит вам договориться о более выгодных тарифах страхования оборудования предприятия.
- ▶ Вы можете «заставить» технологические машины работать с большей интенсивностью, чтобы получить дополнительную продукцию, если это необходимо, одновременно осуществляя мониторинг состояния оборудования предприятия.
- ▶ Вы можете уменьшить или исключить регулярные отключения машины.
- ▶ Вы можете создавать резервы производства перед прогнозируемым отключением машины для устранения производственных потерь.

Общим знаменателем всех этих преимуществ является прибыль. Повышение показателя эксплуатационной готовности технологического оборудования и снижение затрат на его обслуживание фактически означают повышенную прибыльность промышленного предприятия.

Просмотрев доступные варианты и стратегии СМ, которые вы можете принять, вы должны сесть и спросить себя, что вы действительно хотите получить от схемы улучшения оборудования предприятия. Вы можете просто захотеть спокойной жизни или повышения надежности машины или же вы можете повысить рентабельность работы оборудования предприятия. Ваши пожелания будут определять то, сколько вы готовы потратить и вложить в СМ. Каковы бы ни были причины для инвестиций, СМ будет возвращать их вам в течение длительного времени после того, как стоимость оборудования будет капитализирована и списана с ваших счетов.

Анализ вибрации

Данные по вибрации имеют высокое информационное наполнение

Результаты измерений уровней вибрации содержат много полезной информации, которая поможет определить состояние машины, например следующие аспекты.

- ▶ Они предоставляют информацию по безопасности работы машины.
- ▶ Они позволяют определить, изменилось ли состояние машины.
- ▶ Их можно использовать для диагностики причины изменения.
- ▶ Их можно использовать для классификации состояния машины.

Измерение уровня вибраций, как правило, является неинтрузивной процедурой измерения, и ее можно выполнять во время работы машины в нормальном состоянии.

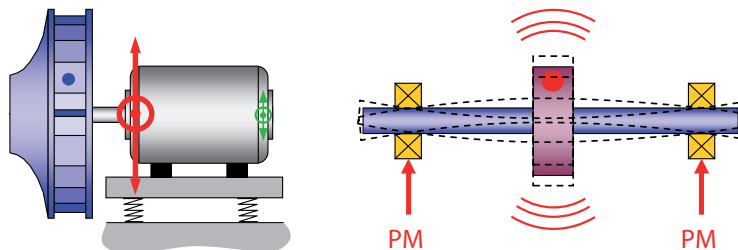
Основные параметры

Вибрация — это результат, вызванный состоянием машины. Вибрация представляет собой простое колебание относительно опорной точки (т. е. вал вибрирует относительно корпуса части машины, а подшипник вибрирует относительно корпуса подшипника). Вибрация существует, если система реагирует на некоторое внутреннее или внешнее возмущение. Она может быть классифицирована по 3 основным типам.

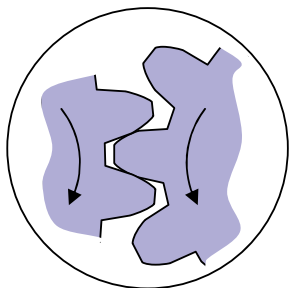
Амплитуда колебаний зависит от величины силы возбуждения, массы и жесткости системы и ее демпфирования. Вибрация возникает из-за того, что мы не можем изготовить идеальную машину или идеально ее установить. Если бы можно было создать идеальную машину, то центр масс вращающегося элемента был бы расположен точно в центре тяжести. Когда центр масс и центр тяжести не совпадают, ротор имеет тяжелую точку и некоторую степень дисбаланса. Этот дисбаланс создает вибрацию, пропорциональную массе тяжелой точки. Дополнительными источниками вибрации являются допуски машин, конструкция машин и подшипников, нагрузка и смазка, монтаж машины, качение и трение между движущимися частями.

Для успешного анализа вибрации необходимо понимать терминологию, используемую для описания компонентов вибрации.

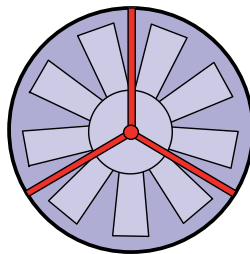
Свободная вибрация корпуса



Вибрация зубчатых пар и вибрация при прохождении тел

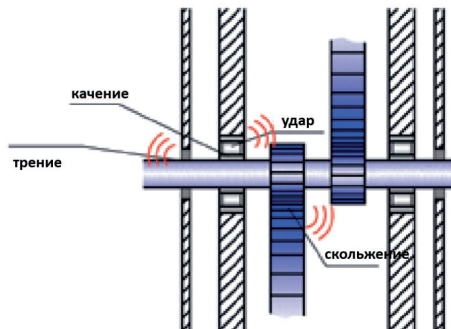


Частота вибраций зубчатой пары



Вибрация при прохождении лопаток

Фрикционная вибрация



Частота

Частота представляет собой циклическое перемещение за определенную единицу времени. Единицы частоты

- ▶ об/мин = число оборотов или циклов в минуту
- ▶ Герц (Гц) = число оборотов или циклов в секунду

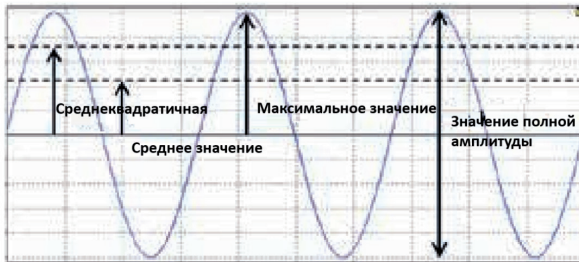
Эти единицы связаны с помощью формулы: $F = \text{частота в герцах} = \text{об/мин} / 60$.

Амплитуда

Амплитуда представляет собой величину динамического движения при вибрации. Обычно она выражается с помощью любого из следующих терминов.

- ▶ RMS (среднеквадратичная); амплитуда; двойное амплитудное значение

На рисунке ниже показана взаимосвязь этих трех единиц измерения, связанных с амплитудой.



Как правило, амплитуда, выраженная в виде смещения, скорости или ускорения, является показателем степени серьезности вибрации. Поскольку промышленные стандарты степени серьезности вибрации будут выражены в одном из этих терминов, необходимо четко понимать их взаимоотношения. Следует проявлять осторожность, чтобы выбрать «тип» измерения амплитуды при сравнении вибрации машины с промышленными стандартами.

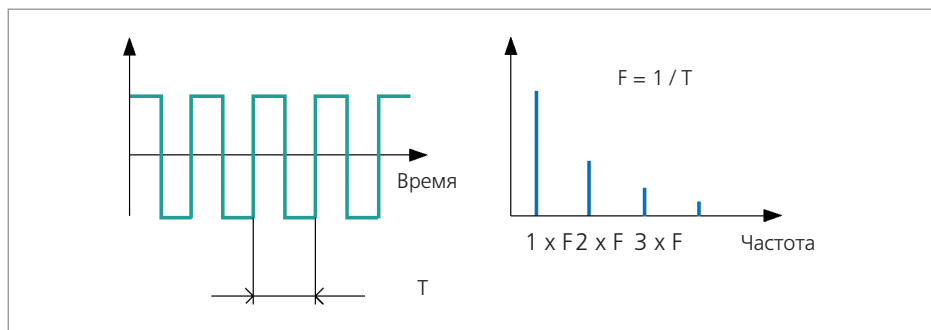
Основная частота

Основная частота представляет собой первичную частоту вращения машины или вала, которая контролируется и обычно называется рабочей частотой вращения машины.

Кроме того, можно встретить основную частоту, выраженную в виде 1 x об/мин или Гц; если взять в качестве примера двигатель с частотой вращения вала 1800 об/мин, то эта частота будет составлять 30 Гц ($1 \times 1800 / 60$). Основная частота очень важна, поскольку многие неисправности оборудования, такие как расцентровка или дисбаланс, возникают при некоторой частоте, кратной основной, например расцентровка при 1-кратной основной частоте.

Гармоники

Гармоники представляют собой сигналы вибрации, имеющие частоты, которые являются точными кратными основной частоты (т. е. $1 \times F$, $2 \times F$, $3 \times F$ и т. д.).



Смещение (D)

Смещение — это фактическое физическое перемещение вибрирующей поверхности. Оно обычно выражается в милах (тысячные доли дюйма) или микронах. При измерении смещения нас интересует двойная амплитуда смещения, которая представляет общее расстояние от верхнего предельного положения перемещения до нижнего.

Скорость (V)

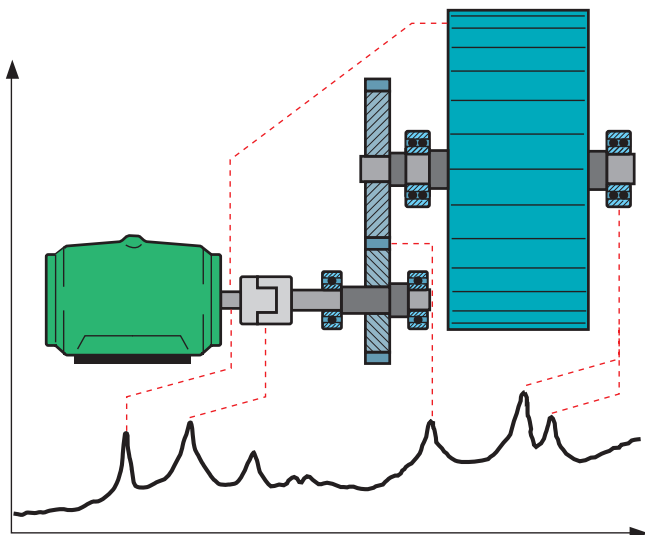
Скорость — это быстрота, с которой происходит смещение. Мы определяем скорость в виде быстроты изменения относительного положения. Скорость обычно измеряется в мм/сек ср. кв. или в дюймах/сек ср. кв.

Ускорение (A)

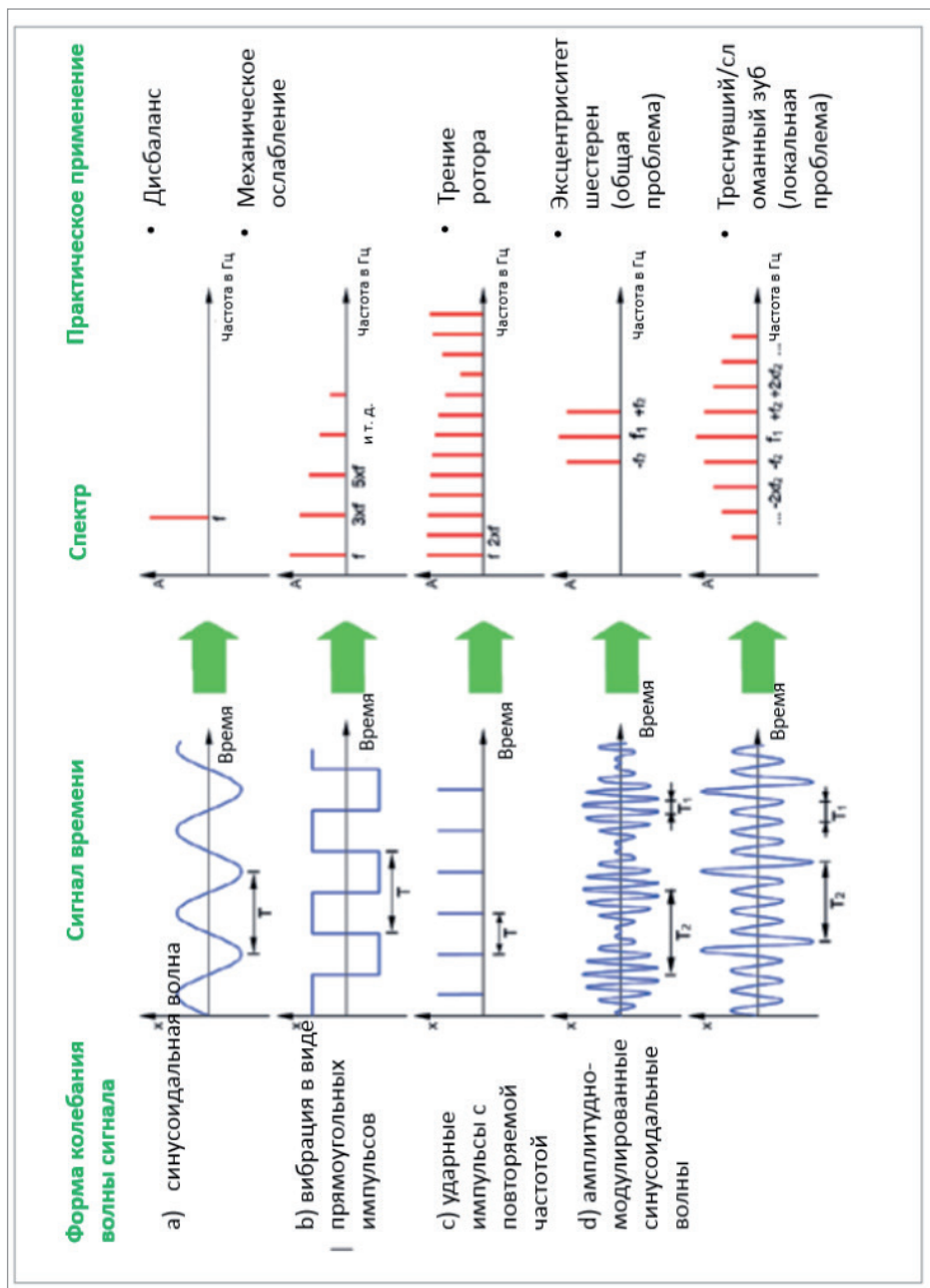
Ускорение — это степень изменения скорости. Этот показатель можно просто определить в виде изменения скорости за определенный промежуток времени или изменения скорости. Ускорение обычно измеряется в m/d^2 или в единицах g силы тяжести.

Частотный спектр вибрации

Вибрация оборудования включает различные частотные составляющие, как показано ниже. Амплитуда каждой частотной составляющей характеризует состояние конкретного вращающегося элемента внутри машины.

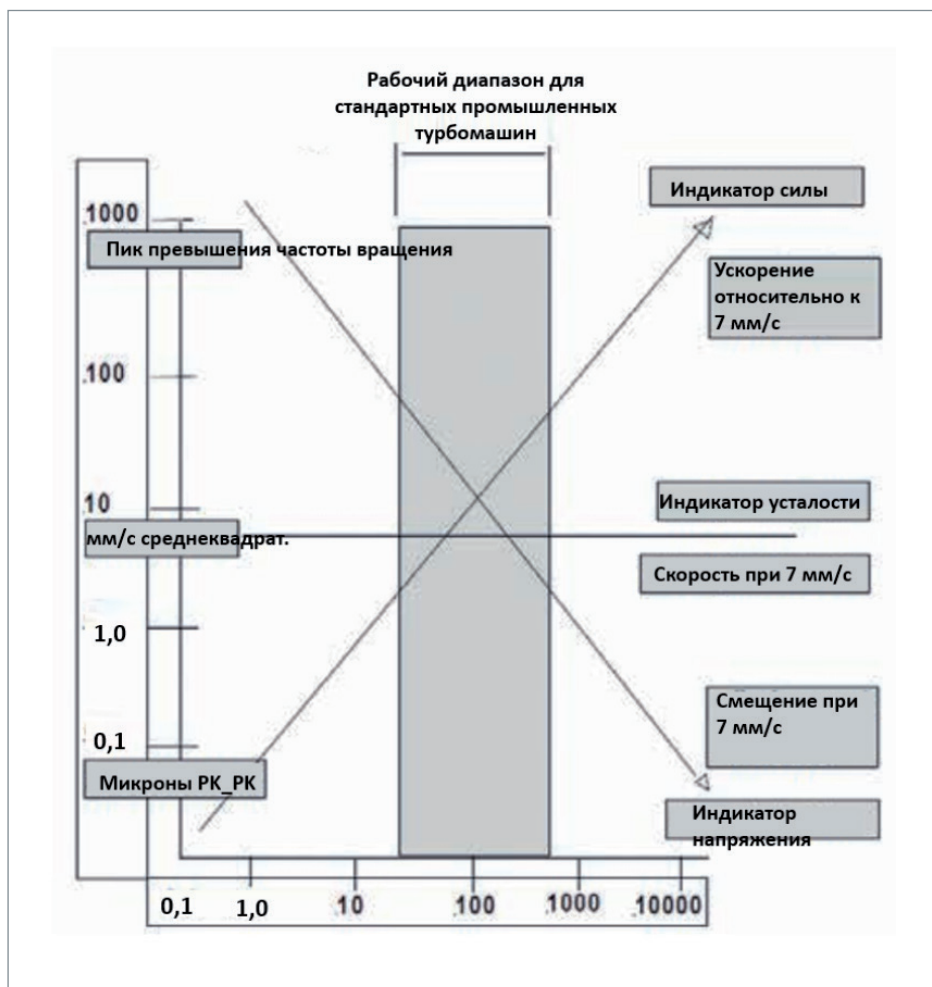


Анализ частотного спектра позволяет нормализовать каждый компонент вибрации, чтобы разделить сложный спектр машины на отдельные компоненты. Такая возможность упрощает анализ механической деструкции внутри машины. На следующем рисунке показаны типичные формы сигналов для различных компонентов машины.



Взаимосвязь между смещением, скоростью, амплитудой и частотой

Изменения значений скорости и ускорения в зависимости от частоты чрезвычайно важны; они формируют основу для критериев степени серьезности вибрации, дают рекомендации по выбору переменной, которая будет наиболее характерной для определенной цели, и поясняют, как могут возникать отказы без предупреждения, в том случае если отслеживается неправильная переменная. Этот вариант лучше всего может быть проиллюстрирован графиком смещения и ускорения относительно частоты при постоянной амплитуде скорости 7 мм/с, как показано ниже.



Обратите внимание, что скорость, по-видимому, является действительным индикатором состояния во всем диапазоне частот. Это основная причина, по которой вибрация используется в качестве основного индикатора механического состояния.

Взаимозависимость смещения, скорости и ускорения также обеспечивает наилучшую индикацию того, какой параметр следует измерять для оценки состояния. На диаграмме четко показано, что при исследовании низких частот, приближенных к рабочим оборотам большинства машин или ниже этих оборотов, измерения смещения или скорости, вероятно, будут давать сигнал наилучшего качества. С другой стороны, такие явления, как резонансы подшипников при 5–10 кГц и выше, лучше всего измеряются через ускорение.

FFT (быстрое преобразование Фурье)

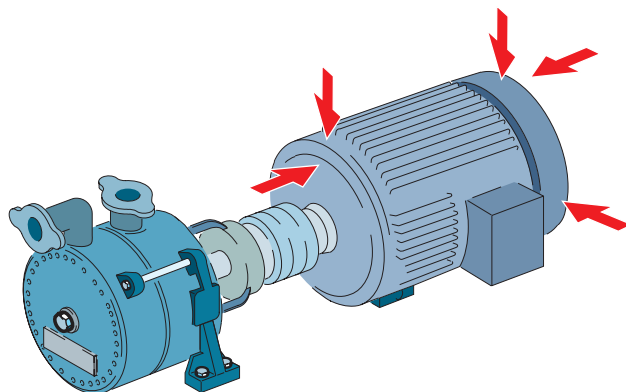
FFT является инструментом, наиболее часто используемым при анализе спектральных данных при выполнении анализа вибрации компонентов машины. Преобразование Фурье представляет собой математическую операцию, которая разлагает функцию во временной области на компоненты ее частотной области.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Место установки

Положение и метод сбора данных очень важны для успешной реализации программы мониторинга вибрации. Для того чтобы правильно диагностировать неисправность, необходимо собирать данные в правильной плоскости; кроме того, они должны быть повторяемыми. Для некоторых неисправностей характерна высокая амплитуда в радиальном направлении, а для некоторых — в осевом.

Как правило, место измерения должно находиться на открытых участках машины, которые доступны в обычном режиме и которые представляют вибрацию корпуса подшипника. Вертикальные и горизонтальные направления монтажа являются наиболее частыми местами установки преобразователей для горизонтально установленных машин; любое угловое положение является допустимым при условии, что такое положение разумно представляет динамические силы, присутствующие в машине. Для вертикально смонтированных машин в качестве будущей контрольной точки мониторинга следует использовать место, дающее максимальное значение вибрации.



Точки сбора данных должны быть четко обозначены, чтобы обеспечить сбор данных каждый раз в одной и той же точке. (Зачастую измерительные контакты постоянно закрепляются на машине, обеспечивая воспроизводимость места измерения.) При анализе изменений состояния машины анализ может оказаться неточным, если данные будут получены из разных точек.

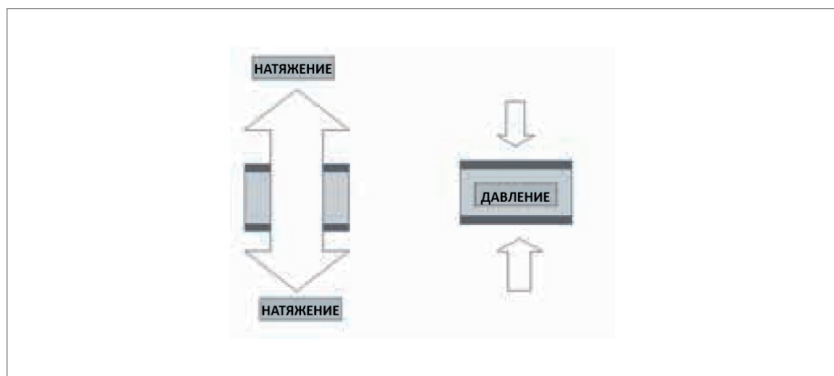
Измерения следует проводить в тот момент, когда ротор и главные подшипники достигли нормальной рабочей температуры, частоты вращения, нагрузки, напряжения и давления. В случаях когда обороты машины изменяются, измерения следует проводить при любых условиях работы машины в течение длительного периода времени.

Конструкция преобразователей

Существуют различные приборы (преобразователи), которые преобразуют фактическое механическое движение (вибрацию) в электрическую энергию.

Промышленный акселерометр

Акселерометры представляют собой преобразователи, наиболее широко используемые в обычных программах мониторинга вибрации. В состав стандартного акселерометра входит пьезоэлектрический кристаллический элемент, который предварительно нагружен массой определенного типа, а вся сборка заключена в прочный защитный кожух. Пьезоэлектрический кристалл выдает электрический сигнал в то время, когда он физически нагружен под действием давления или натяжения, как показано ниже.



Переменная сила вибрации, создаваемая массой на кристалле, создает электрический выходной сигнал, пропорциональный ускорению. Акселерометры имеют широкий частотный диапазон, обычно от 2 Гц до 10 кГц. Для монтажа акселерометра можно использовать шпильку, магнит, клей или просто вручную удерживать его на поверхности машины. Кроме того, акселерометры отличаются хорошими температурными и экологическими характеристиками и, как правило, прочной конструкцией.

Частотная характеристика акселерометра

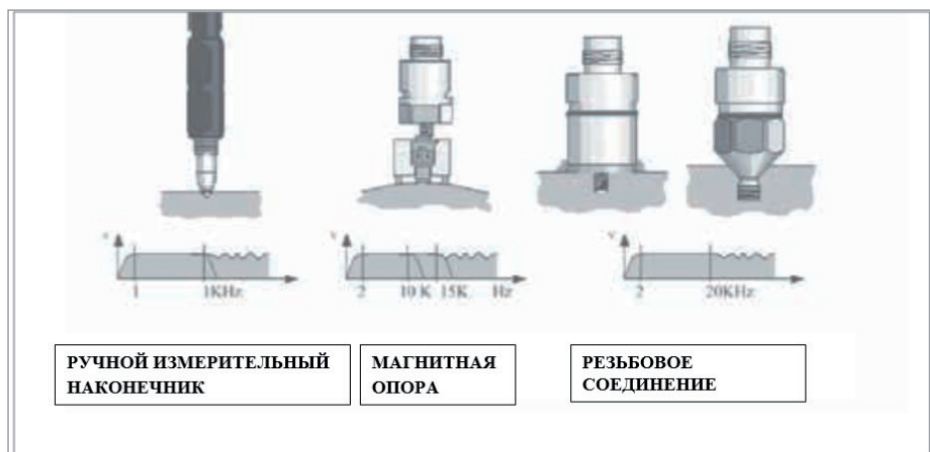
Для каждого акселерометра характерны свои частотный диапазон и кривая чувствительности, как показано ниже. Если собранные данные находятся за пределами диапазона частот, показанного на кривой чувствительности, необходимо выбрать акселерометр с подходящей чувствительностью. Как правило, чем меньше размеры акселерометра, тем выше диапазон используемых частот.



Типичная реакция акселерометра для резьбовых или клеевых преобразователей

Монтаж акселерометра

Порядок монтажа акселерометра оказывает большое влияние на его частотную характеристику. Далее показаны четыре разных варианта монтажа преобразователей, каждый из которых может использоваться в программах анализа вибрации.



Блок с креплением винтами или шпильками и соответствующим акселерометром имеет частотную характеристику около 20 кГц. Эпоксидное крепление (клеевое крепление) обеспечивает примерно одинаковую чувствительность. Крепление на постоянном магните имеет частотную характеристику приблизительно 5 кГц, в то время как ручную удерживаемое устройство обычно обеспечивает около 1,5 кГц. Чем плотнее контакт преобразователя с машиной, тем лучше частотная характеристика и, следовательно, тем лучше надежность считывания показаний вибрации.

Обработка сигнала

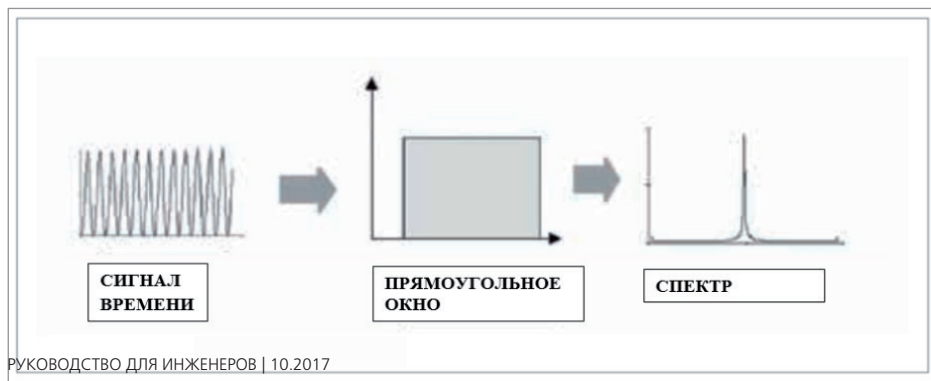
Необработанные данные, собираемые преобразователями, должны быть преобразованы, чтобы получить полезную информацию. В случае данных вибрации эти необработанные данные должны быть «обработаны» для предотвращения ошибок. Обычно такая подготовка включает следующие операции.

- ▶ Фильтрация для удаления нежелательных или ложных сигналов
- ▶ Усиление для увеличения разрешения сигналов малой силы
- ▶ Усреднение данных для удаления ложных данных
- ▶ Преобразование в частотную область (FFT)

Для поддержки этих методов фильтрации многие анализаторы предоставляют ряд «оконных» функций, которые в зависимости от выбранного типа будут использоваться для анализа данных.

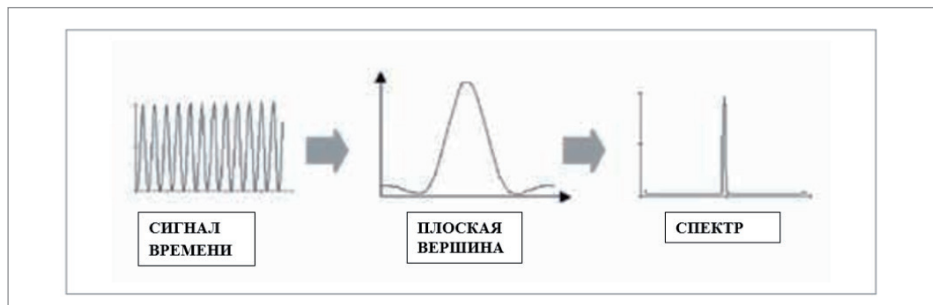
Прямоугольное окно

Этот тип окна обеспечивает меньшую точность в амплитудной области, но более высокую точность в частотной области. Область применения этого окна относится к переходным процессам, таким как ударные испытания для определения собственных частот компонентов.



Окно с плоской вершиной

Это окно обеспечивает наивысшую точность для амплитудной области, но повышенную погрешность в области частотного разрешения.



Окно Хеннинга

Данное окно является стандартным для большинства видов анализа вибрации; оно обеспечивает наилучшую точность для области частотного разрешения, но повышенную погрешность в области амплитуды.



ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Как уже говорилось ранее, основной задачей программы мониторинга вибрации является обнаружение неисправностей на начальном этапе работы машины. Как правило, методологии, связанные с прогнозированием неисправностей, предусматривают сравнение текущей информации о вибрации с описанием вибрации на определенной или аналогичной машине в удовлетворительном рабочем состоянии. Это сравнение производится двумя способами.

- ▶ Сравнение с промышленными стандартами — ISO 10816-3-7
- ▶ Сравнение с ранее измеренными показаниями

ISO 10816-3-7

Стандарт ISO 10816-3-7 является действующим стандартом для оценки «стандартного» рабочего состояния вращающейся машины. Выпущенный в 2009 году, этот стандарт распространяется на «промышленные машины больших и средних размеров с номинальной мощностью выше 15 кВт и номинальными оборотами от 120 до 15 000 об/мин». Кроме того, сюда добавлены насосы в качестве конкретной категории для рассмотрения. Такой диапазон охватывает большинство вращающихся машин, поэтому он может использоваться в качестве хорошего руководства для определения условий эксплуатации на месте. Таблица, приведенная ниже, представляет требования стандарта и позволяет быстро сравнивать фактическое состояние с нормальным рабочим состоянием.

ISO 10816-3		Группа 1		Группа 2		ISO 10816-7		Категория 1		Категория 2		r < 600 об/мин 0.5 об/мин 1.0 об/мин 2.0 об/мин
Тип агрегата	Большие агрегаты 300 кВ < P < 50 МВ		Средние агрегаты 15 кВ < P < 300 кВ		Тип насоса	Основные		Вспомогательные				
Фундамент	Виброопора	Жесткий	Виброопора	Жесткий	Мощность	< 200 кВ	> 200 кВ	< 200 кВ	> 200 кВ			
Виброскорость V _{эф} мм/с скз	11,0	D	D	D	7,6	D	D	9,5	D	Вибропределение r _{пн} 130 80 50 мкм	D	
	7,1	C	C	C	6,5	C	C	8,5	C			
10 – 1000 Гц r > 600 об/мин	4,5	B	B	B	5,0	B	B	6,1	B			
2 – 1000 Гц 120 < r < 600 об/мин	3,5	A	A	A	4,0	A	A	5,1	A			
	2,8	A	A	A	3,5	A	A	4,2	A			
	2,3	A	A	A	2,5	A	A	3,2	A			
	1,4	A	A	A	мм/с скз	A	A	мм/с скз	A			A
		A	A	A		A	A		A			A
		A	A	A		A	A		A			A
		A	A	A		A	A		A			A

При сравнении этих стандартов с фактическими условиями работы машины неизбежно будут возникать различные отклонения. Однако не следует считать машины негодными из-за различий в показаниях, не рассмотрев при этом другие потенциальные причины возможной разницы в показаниях.

В диаграмме на предыдущей странице показаны 4 зоны вибрации: от допустимой до неприемлемой.

- ▶ Зона А — в эту зону обычно попадают характеристики вибрации машин, только что введенных в эксплуатацию машин.
- ▶ Зона В — машины с вибрацией в этой зоне обычно считаются приемлемыми.
- ▶ Зона С — машины с вибрацией в этой зоне обычно считаются непригодными для длительной непрерывной эксплуатации. Машина может работать в этом состоянии в течение ограниченного периода времени до тех пор, пока не возникнет подходящая возможность для устранения повышенной вибрации. (В течение этого периода работы рекомендуется увеличить частоту контроля вибрации.)
- ▶ Зона D — вибрации в этой зоне обычно считаются достаточно серьезными, чтобы вызвать повреждение машины.

Использование этих зон и числовые значения, которые их описывают, не предназначены в качестве стандарта приемки для производителей машин и клиентов, однако эти значения помогают установить критерии аварийных сигналов и предупреждений для обычной программы мониторинга состояния. Если обнаружено, что уровни вибрации работающих машин последовательно превышают номинальные значения, указанные в стандарте, необходимо провести исследование причин такого состояния.

Сравнение с предыдущими показаниями

Этот метод чаще всего используется для определения изменений в рабочем состоянии машины. Сравнение, часто называемое анализом тренда, быстро показывает оператору машины или руководителю, изменилось ли состояние машины, если да, то насколько и в какой период времени. Приведенные в тренде графические значения измерений в сочетании с предельными значениями аварийных сигналов по ISO обеспечивают четкие визуальные предупреждения об изменении состояния машины и при использовании некоторых пакетов программного обеспечения могут применяться для прогнозирования интервалов бесперебойной работы, чтобы запланировать ремонтные работы для устранения неисправности. (Графические прогнозы трендов машин следует рассматривать в качестве руководства для определения вероятной неисправности, а не в качестве окончательного измерения интервалов отказа машины.)

Анализ типа неисправности

Существует множество литературы по диагностическим методам, используемым для различных типов оборудования. Хотя мы не собираемся обсуждать в этом руководстве конкретные методы диагностики, вы скоро обнаружите, что для обеспечения эффективной реализации программы мониторинга вибрации необходимо обеспечить легкий доступ к большому количеству информации. После того как программа мониторинга вибрации указала на определенную машину как на потенциального носителя механической неисправности, необходимо ответить на следующие вопросы.

- ▶ Насколько серьезной является неисправность?
- ▶ В чем заключается неисправность?
- ▶ Когда машина должна быть выведена из эксплуатации для ремонта?

Диагностика машины с использованием анализа вибрации предоставляет информацию, которая отвечает на эти вопросы.

Рассмотренная здесь методика диагностики оборудования основана на методе, известном как анализ «режима отказа». Этот метод использует тот факт, что определенные механические события, такие как дисбаланс, расцентровка, ослабление, дефекты подшипника, неисправности аэродинамических и гидравлических систем, неисправности редуктора, обычно генерируют частоты вибраций по определенным шаблонам. Частота, амплитуда и структура пиков в спектре вибрации могут быть убедительным признаком типа неисправности, существующей на данной машине. Принципы анализа «режима отказа» включают следующее.

- ▶ Измерение параметров механических неисправностей, таких как дисбаланс и расцентровка, которые генерируют механическую вибрацию по четко определенному шаблону частот.
- ▶ Сравнение уровней и спектров вибрации для аналогичных типов машин поможет установить степень серьезности и причину возникновения проблемы с вибрацией.

На следующей схеме представлены сводные данные для конкретных неисправностей оборудования и их шаблоны вибрации.

Возможная причина	Доминирующая частота	Направление	Комментарий
Дисбаланс	1-кратная частота вращения	Радиальное для динамического дисбаланса; возможное осевое	Амплитуда вибрации, пропорциональная дисбалансу и числу об/мин — вызывает сильную вибрацию.
Расцентровка	2-кратная частота вращения	Радиальное и осевое	Сильная осевая вибрация 2-й гармоники, наилучшая центровка с использованием системы лазерной центровки.
Дефект подшипника	Высокочастотная вибрация	Радиальная и осевая нагрузка	Используйте диагностику подшипника по спектру огибающей или ударный импульс для определения серьезности повреждения.
Фундаменты машин	Обычно на одной или нескольких собственных частотах (переходная вибрация)	Радиальное	Собственная резонансная частота фундамента или опорной плиты машины.
Вибрации ремня	Частота вращения и ее кратные	Радиальное	Дополнительно рекомендуется использовать строб для комбинирования числа оборотов машины и скорости ремня, чтобы проверить проскальзывание ремня.
Вибрация при прохождении лопаток	Число лопастей или лопаток, умноженное на основную частоту	Радиальное	Частота вибрации, представленная числом лопастей, умноженным на число об/мин вала.
Электрическая часть	Линейная частота, 50 Гц (Великобритания), 60 Гц (США) и их кратные	Радиальное и осевое	Могут возникнуть боковые полосы частот при кратных значениях частоты вращения; вибрация прекращается при отключении питания.
Дефект по частоте вибраций зубчатой пары	Частота вибраций зубчатой пары равна числу зубьев х число об/мин шестерни	Радиальное и осевое	Возникают боковые полосы частот из-за модуляции вибрации зубьев шестерен при определенных оборотах, например, при частоте вращения выходного вала редуктора.
Резонанс	Собственная частота компонентов	Радиальное и осевое	Собственная частота компонентов совпадает с частотой возбуждения.

Дисбаланс

Вибрация, вызванная дисбалансом, происходит на частоте, равной 1 об/мин для несбалансированной детали, а амплитуда вибрации пропорциональна имеющемуся дисбалансу.

Обычно наибольшая амплитуда будет измеряться в радиальном (вертикальном или горизонтальном) направлении.

Расцентровка

Как правило, между валами, соединенными с муфтой, редуктором или другими промежуточными приводами, может возникать расцентровка. Существует три типа расцентровки.

- ▶ Угол перекоса — где осевые линии двух валов пересекаются под углом.
- ▶ Смещение — когда центральные линии вала смещены относительно друг от друга.
- ▶ Комбинация расцентровки по углу перекоса и смещению.

Согнутый вал по своим характеристикам очень похож на угловое смещение, поэтому его вибрационные характеристики включены в диапазон расцентровки.

Расцентровка, даже при наличии упругих муфт, создает две силы, осевую и радиальную, что приводит к возникновению осевой и радиальной вибрации. Основной характеристикой вибрации, связанной с расцентровкой или изгибом вала, является то, что эта вибрация будет распространяться как в радиальном, так и в осевом направлениях. По этой причине, если осевая вибрация превышает половину самого большого измерения в радиальном направлении (по горизонтали или вертикали), следует подозревать расцентровку машины или согнутый вал.

Все состояния расцентровки будут приводить к возникновению вибрации составляющих основной частоты (1 x об/мин), поскольку они создают несбалансированное состояние машины. Иногда расцентровка вызывает вибрацию на второй гармонике (2 x об/мин).

Ослабление

Механическое ослабление может быть вызвано ослабленными вращающимися компонентами или фундаментами машины.

Такое состояние вызывает вибрацию с частотой, вдвое превышающей частоту вращения (2 x об/мин), и более высокими порядками частоты для детали машины с ослабленной деталью. Кроме того, в большинстве случаев будет возникать вибрация на основной (1 x об/мин) частоте.

Проблемы с подшипниками

Одним из результатов повреждения тела качения подшипников является то, что дефект подшипника будет возбуждать собственные частоты компонентов подшипника. Резонансная вибрация, или «звон», происходит на частотах от 2 до 60 кГц.

Эта вибрация наиболее эффективно измеряется на уровне ускорения в единицах пика *g*. Измерение вибрации осуществляется системой мониторинга состояния в виде измерения HFE (высокочастотная энергия) и обеспечивает эффективную индикацию состояния тела качения подшипников. Основываясь на опыте практической работы, можно сказать, что метод ударных импульсов хорошо работает на двигателях и другом маломощном оборудовании. Следует проявлять осторожность при использовании данного метода для насосов и редукторов, где поток, кавитация и зацепление зубьев могут создавать импульсы, которые накладывают помехи и маскируют удары, вызванные дефектами подшипника.

Частота вращения, связанная с движением тела качения, корпуса и дорожек, также обусловлена механическим разрушением подшипника. Эти частоты зависят от геометрии подшипника и частоты вращения вала, как правило, их можно обнаружить в диапазоне 3–10 x об/мин; в связи с этим метод «огигающей» является наиболее широко используемым методом обнаружения дефектов, специфических для подшипника. Этот метод оценки состояния подшипника и анализ с помощью ударного импульса рассмотрены на следующих страницах.

Неисправности аэродинамических и гидравлических систем

Аэродинамическая и гидравлическая вибрация, обычно связанная с лопатками или лопастными машинами, такими как насосы или компрессоры, образуется при возникновении неустойчивого или неуравновешенного состояния внутри машины.

В большинстве случаев это приведет к возникновению вибрации на основной частоте (1 x об/мин) машины и частотных составляющих вибрации при прохождении лопаток/лопастей.

Неисправности редуктора

Дефекты зубчатых колес или неисправные шестерни производят высокочастотную вибрацию с низкой амплитудой. Преобладающей частотой вибрации является частота вибраций зубчатой пары. Частота вибраций зубчатой пары рассчитывается следующим образом.

Частота вибраций зубчатой пары (GMF) = частота вращения выходной шестерни \times количество зубьев выходной шестерни

Пример

Шестерня с 52 зубьями, вращающаяся с частотой вращения 90 об/мин ($90 / 60 = 1,5$ Гц). $GMF = 52 \times 1,5 = 78$ Гц.

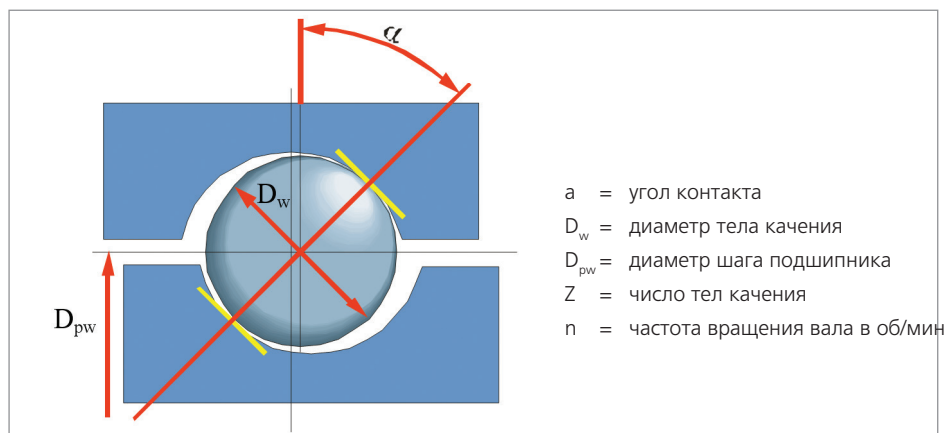
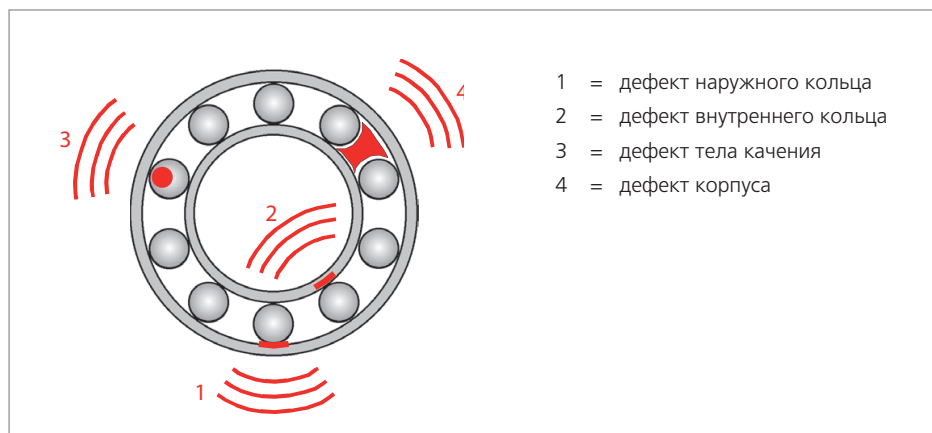
Большинство проблем с шестернями создают вибрацию на частоте вибрации зубчатой пары, их можно объединить следующим образом.

- ▶ Дисбаланс — преобладает при значении 1 х об/мин редуктора.
- ▶ Расцентровка — преобладает при оборотах 1 х об/мин и 2 х об/мин; может возбуждать GMF.
- ▶ Биение по делительной окружности — преобладает при GMF с боковыми полосами при 1 х об/мин.
- ▶ Неисправные зубья шестерни — преобладают при GMF с боковыми полосами при 1 х об/мин неисправной шестерни.

Основная теория огибающей

Если существует дефект подшипника в подшипнике качения, то сигнатура вибрации будет показывать высокочастотную вибрацию, возникающую каждый раз при касании поврежденного ролика или дорожки. Эти частоты повторения известны как собственные частоты дефектов подшипника. Для любого подшипника качения характерны четыре типа частоты дефектов тела качения.

- ▶ Частота прохождения шарика по наружной дорожке — BPFO
- ▶ Частота прохождения шарика по внутренней дорожке — BPFI
- ▶ Частота собственного вращения шарика — BSF (дефект тела качения)
- ▶ Основная частота привода — FTF (дефект корпуса)



Формула для расчета частот дефектов подшипников:

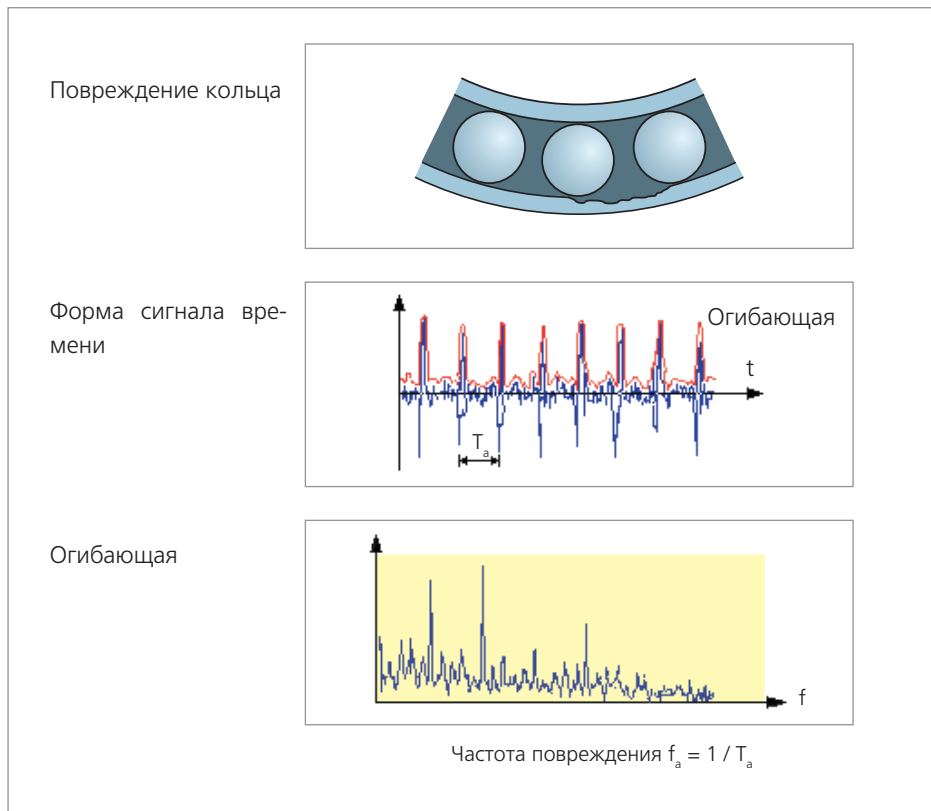
- ▶ $BPFO = Z * n / (60 * 2) * (1 - (D_w / D_{pw} * \cos(a)))$
- ▶ $BPFI = Z * n / (60 * 2) * (1 + (D_w / D_{pw} * \cos(a)))$
- ▶ $BSF = (D_{pw} * n) / (D_w * 60 * 2) * (1 - [D_w / D_{pw} * \cos(a)]^2)$
- ▶ $FTF = n / (60 * 2) * (1 - (D_w / D_{pw} * \cos(a)))$.

Пример Частоты следования

Тип подшипника SKF 6211, рабочие обороты 2998 об/мин

Размеры	Частоты дефектов
$D_{pw} = 77,50$ мм $D_w = 14,29$ мм $Z = 10$ $a = 0$	$BPFO = n / 60 * 4,0781 = 204$ Гц
	$BPFI = n / 60 * 5,922 = 294$ Гц
	$BSF = n / 60 * 5,239 = 264$ Гц
	$FTF = n / 60 * 0,4079 = 20$ Гц

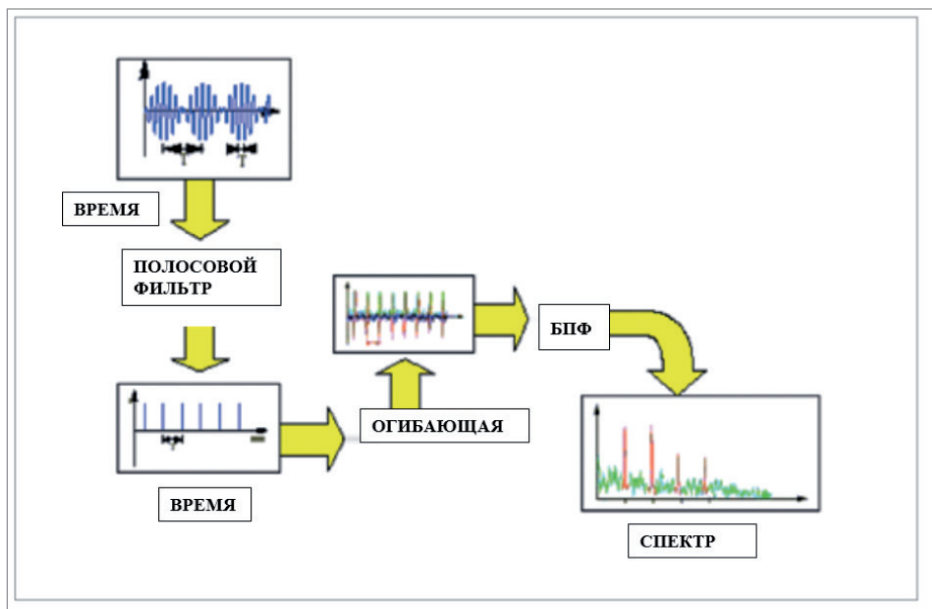
Анализ огибающей по существу является двухэтапным процессом; первый этап связан с полосовой фильтрацией формы сигнала времени. Процесс фильтрации приводит к возникновению острых пиков, когда огибающая применяется для извлечения частоты повторения, связанной с дефектом подшипника и его гармониками, как показано на следующих частотных спектрах. Поскольку работоспособные подшипники качества могут демонстрировать вибрацию на собственной частоте компонентов подшипника, очень важно точно измерить степень ухудшения характеристик подшипника.



Для измерения степени серьезности дефекта в спектре огибающей необходимо выполнить следующее.

- ▶ Измерьте амплитуду для конкретного компонента в дБ (децибелах) выше значения покрытия, показанного в спектре.
- ▶ Приведенный выше спектр определяет значения покрытия и пиков.
- ▶ Опыт показывает, что при ухудшении характеристик подшипника можно увидеть разницу между пиком и покрытием около 10 дБ. Это не означает, что разрушение подшипника неизбежно. Поскольку ухудшение продолжает выдавать разницу примерно в 15 дБ между уровнями пика и покрытия, необходимо внимательно следить за подшипником и в какой-то момент подготовиться к ремонту машины.

- ▶ Если амплитуда дефекта составляет 20 дБ или более, необходимо немедленно принять меры для ремонта и/или замены подшипника.
- ▶ Не следует использовать уровень покрытия подшипника в качестве автономного метода контроля состояния подшипника, его необходимо применять в сочетании с другим методом определения тренда, например с методом измерения ударных импульсов.



На диаграмме выше показаны действия, связанные с получением спектра огибающей для подшипника.

ПОДХОД НА ОСНОВЕ ЗДРАВОВОГО СМЫСЛА

Большинство проблем с вибрацией можно легко решить, используя логический, систематический подход. Далее представлен список подходящих действий, направленных, во-первых, на определение проблемы, а во-вторых, на ее решение.

Необработанные данные

- ▶ В каком месте находится максимальный уровень вибрации на машине и в каком направлении?
- ▶ Вибрация присутствует в соответствующих машинах и трубопроводах или она является максимальной на корпусах подшипников?
- ▶ Изменения в технологическом процессе и смазке подшипников радикально изменяют ответную вибрацию?
- ▶ С течением времени тренд демонстрирует примерно экспоненциальный рост?
- ▶ Как работает и звучит машина по сравнению с аналогичными машинами, установленными в другом месте?

Диагностика

- ▶ Эта машина является новой или на ней недавно работали? Если да, то возможно ли, что она была собрана неправильно и это отразилось на необработанных данных?
- ▶ Какие частоты доминируют в спектре? Они возникают на частотах вибраций зубчатой пары или на кратных низшего порядка частоты вращения вала?
- ▶ Как выглядит спектр огибающей для подшипников качения и редукторов?
- ▶ Насколько быстро ухудшаются характеристики машины, и, следовательно, как скоро ее следует отремонтировать? (Сюда входят учет стоимости оборудования, время простоя и расходы на техобслуживание.)
- ▶ Как правило, вибрация в точке максимального повреждения является самой высокой, если не возникает резонансное состояние.
- ▶ Вибрация обычно представляет реакцию машины на неисправность, поэтому единственным способом остановить вибрацию является обнаружение источника, а не устранение реакции.
- ▶ Перед диагностикой необходимо собрать несколько фактов для подтверждения. К доступным вариантам относятся измерения HFE (высокочастотная энергия), спектры, огибающие, температура и звук.

Для каждой неисправности взаимодействие и подтверждение из этих источников будут отличаться.

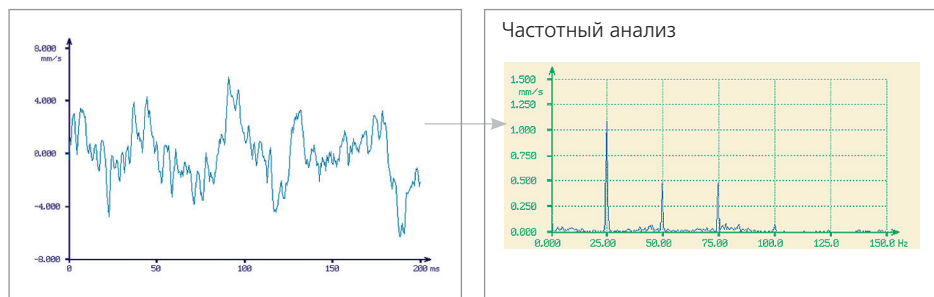
- ▶ Вибрация является физическим явлением и в качестве такового может быть определена с помощью физических средств.

Решения

- ▶ Если неисправность возникла на ранее исправном оборудовании, то после выполнения действий, предложенных выше, будет понятен вероятный источник проблемы. После определения проблемы можно определить наилучшую последовательность действий.
- ▶ Если неисправность возникает на новом или недавно обслуживаемом оборудовании, то источник проблемы может быть неочевиден. Что-то связанное с резонансом? Неверная установка? Наличие ошибок в основной конструкции? Решение проблемы такого типа должно быть получено логическим путем. Пробуйте по одному решению за раз (начиная с наиболее вероятного), снимая новые показания данных на каждом шаге. Постепенно будет определено лучшее решение.
- ▶ Попробуйте объяснить все реакции, вызванные неисправностью, после решения проблемы.

АНАЛИЗ FFT

Как следует из названия этого краткого обзора, в этом разделе основное внимание будет уделено измерениям и последующему анализу результатов измерений уровня вибрации с использованием анализатора FFT. Используя этот анализатор FFT, мы проводим анализ временного сигнала и применяем расчеты для преобразования измеренного сигнала в серию пиков на стандартизованном графике. Каждый пик представляет амплитуду вибрации и частоту. Используя эти два параметра, можно относительно просто определить величину вибрации и основную причину появления наибольших сигнатур вибрации.



Форма сигнала времени

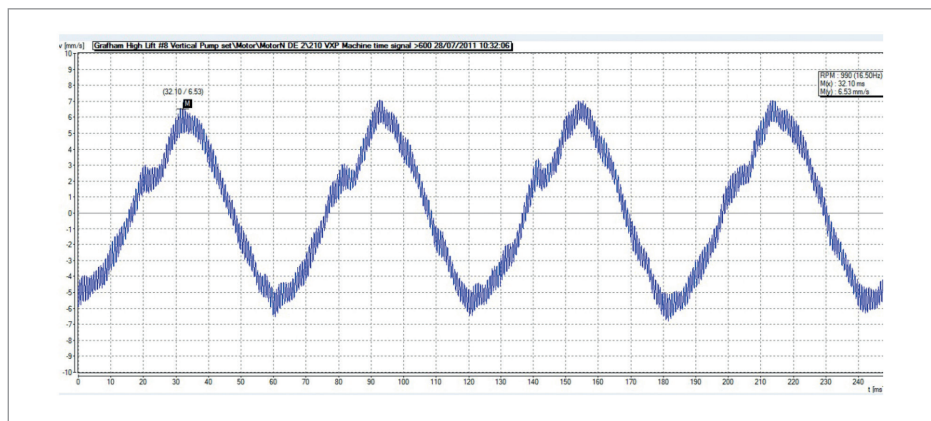
Спектр вибрации машины

Это позволяет определить различные факторы, такие как расцентровка, дисбаланс и механическое ослабление, поскольку каждый фактор демонстрирует свою самую высокую амплитуду вибрации на другой частоте. Например, расцентровка обычно показывает самую высокую амплитуду вибрации при 2-кратной частоте вращения, тогда как дисбаланс характеризуется максимальной амплитудой вибрации при 1-кратной частоте вращения. Как мы увидим позже, мир анализа вибрации не так прост, как этот простой пример. Однако принцип состоит в том, что мы преобразуем сложный (для понимания) анализ временного сигнала в более понятный график вибрации FFT.

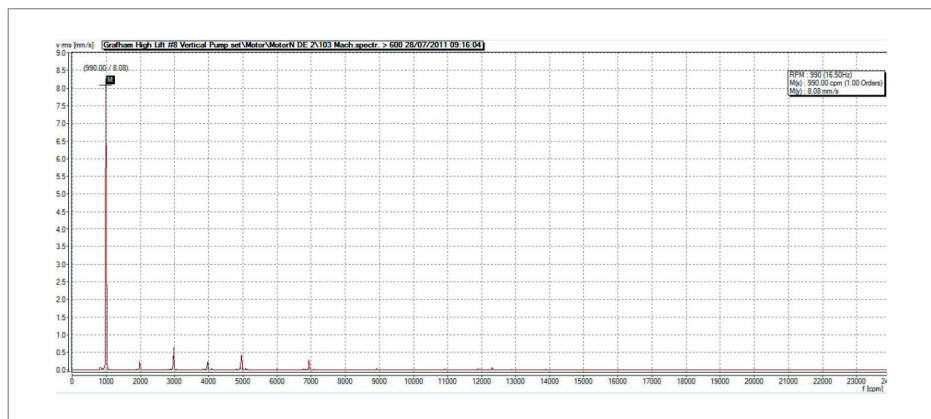
Разные частоты амплитуды вибрации характерны не только для различных факторов, таких как дисбаланс или расцентровка, но и для различных компонентов, таких как подшипники или шестерни. Как правило (для этого первоначального FFT-анализа), компоненты машины имеют более высокие частотные характеристики вибрации, чем серьезные механические дефекты, такие как расцентровка, дисбаланс, ослабление или другие рабочие параметры собранной машины.

Следующие два графика, где временной сигнал для машины, работающей в разбалансированном состоянии, преобразуется в график FFT, ясно демонстрируют дисба-

ланс в понятной форме в виде определенной частоты — в данном случае в циклах в минуту (срт) или в оборотах в минуту (об/мин) машины. Далее представлено объяснение для этого важного преобразования частоты.



Форма временного сигнала для разбалансированной машины при 1000 об/мин



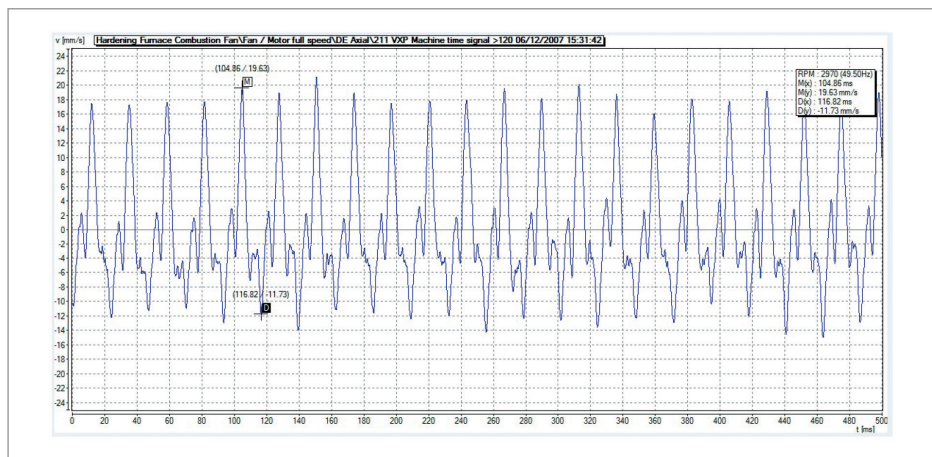
Преобразованный FFT-спектр для вышеупомянутой формы временного сигнала

На предыдущем графике временного сигнала горизонтальная шкала представляет время в миллисекундах, а вертикальная шкала — скорость в мм в секунду. На спектре горизонтальная шкала представлена в циклах в минуту (срт), тогда как вертикальная шкала снова отражает скорость в мм/сек.

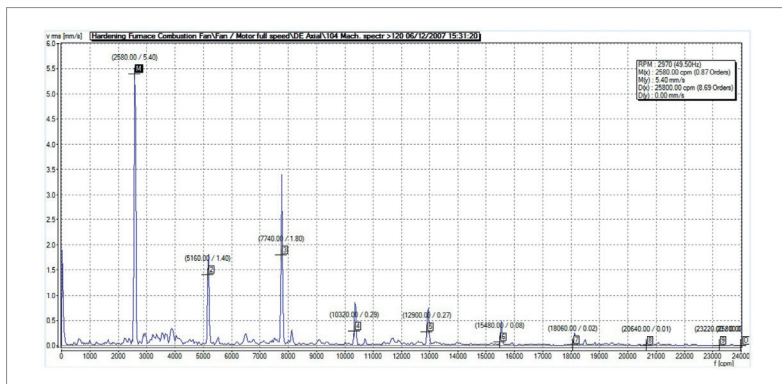
В этом месте необходимо дать некоторые пояснения по горизонтальной шкале на графиках FFT. Существуют два соглашения, которые одинаково действительны при определении шкалы на графике FFT. Для этого используются циклы/обороты в минуту (срм/ррт) или Герцы (Гц). Срм/ррт являются просто терминами для обозначения оборотов машины, а Гц — частота машины; для простоты это срм/ррт, деленные на 60.

Спектр четко показывает большой «всплеск» вибрации на оборотах 1000 об/мин, основную частоту оборотов машины, работающей на 1000 об/мин. Этот «всплеск» возникает при 1-кратной основной частоте машины; меньшие «всплески» присутствуют на 2-, 3-, 4- и 5-кратной основной частоте. Если бы горизонтальная шкала была в Гц, то все «пики» были бы в одном положении, но первый «всплеск» был бы показан на шкале при 16,6 Гц (1000/60).

Данный пример хорошо иллюстрирует возможности преобразования FFT для демонстрации конкретных проблем с машиной в упрощенном формате. Аналогичным образом преобразование в FFT так же хорошо работает для другой общей ошибки машины (расцентровка) (как показано ниже).



Форма временного сигнала для расцентрованной машины при 1000 об/мин

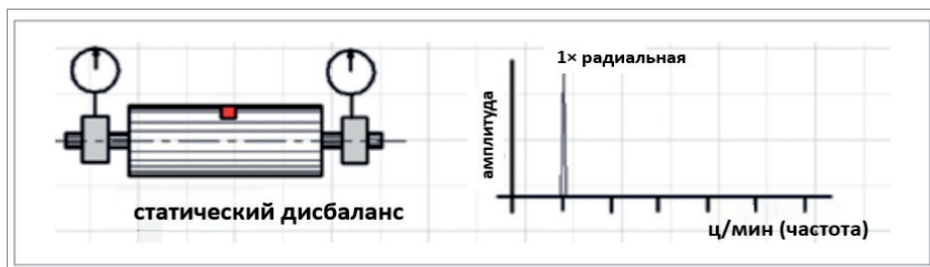


Преобразованный FFT-спектр предыдущей формы временного сигнала

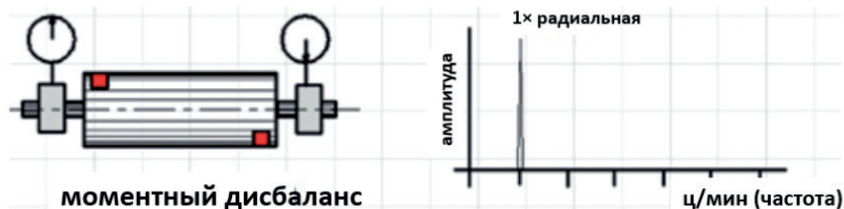
Можно создать базовую справочную таблицу для общих ошибок машины, которая поможет человеку, не знакомому с анализом FFT, диагностировать неисправности машины, однако на данном этапе было бы более полезно для будущего понимания предмета, чтобы мы продолжили объяснение основ. Например, почему дисбаланс демонстрирует самую высокую частоту на основной частоте? Фактически объяснение довольно просто: при вращении несбалансированного ротора несбалансированная сила после каждого оборота машины воздействует на датчик вибрации при максимальной скорости.

Некоторые наиболее часто встречающиеся типы дисбаланса

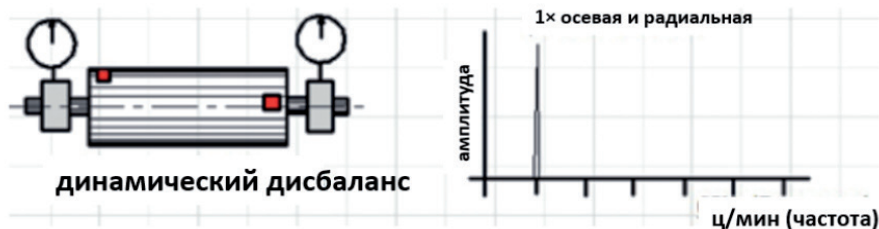
Статический дисбаланс. Этот вид дисбаланса, также называемый вынужденным дисбалансом, возникает тогда, когда тяжелая точка расположена посередине между подшипниками. Эта форма дисбаланса наиболее распространена на роторах, имеющих короткую длину по сравнению с их диаметром.



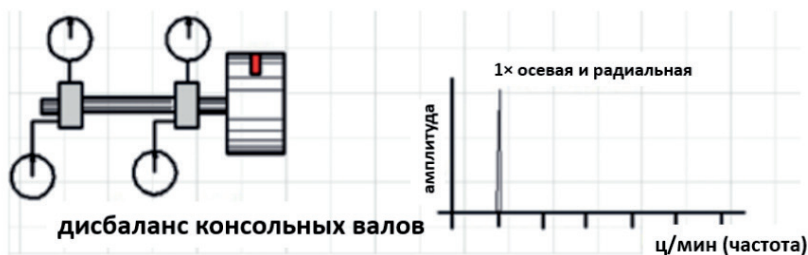
Моментный дисбаланс. Если силы дисбаланса действуют в противофазе под углом 180 градусов на одном и том же валу, то в спектре FFT всегда присутствует и доминирует всплеск 1-кратной частоты. Для коррекции необходимо, чтобы противовесы располагались как минимум в 2 плоскостях.



Динамический дисбаланс. Иногда его называют квазистатическим дисбалансом. Это состояние является наиболее часто встречающейся формой дисбаланса. Она возникает тогда, когда ось вращения вала и распределение веса ротора не пересекаются. Динамический дисбаланс представляет собой комбинацию статического и моментного дисбаланса



Дисбаланс консольных валов Это состояние отличается радиальными и осевыми вибрациями — всегда на 1-кратной частоте. Радиальные сигналы являются результатом влияния изгибов вала, вызванных дисбалансом нагрузки. Осевые показания во время измерения могут меняться и быть нестабильными.

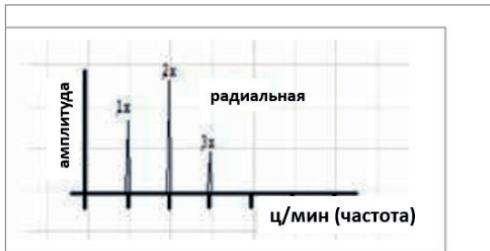
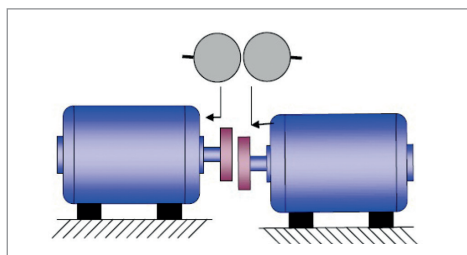


Расцентровка

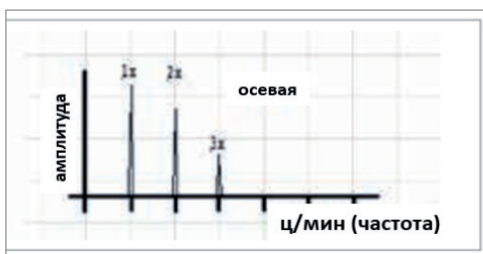
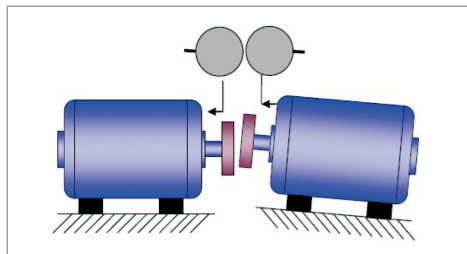
Расцентровка наряду с дисбалансом является одной из наиболее часто встречающихся причин высокой вибрации в соединенных вращающихся машинах, таких как насосы и другие стандартные валопроводы. В отличие от дисбаланса она не дает четкого всплеска частоты на какой-либо одной частоте. Вместо этого расцентровка может быть идентифицирована за счет наличия ее максимальных амплитуд частоты при 1- и 2-кратной величине срт и меньших пиков гармонических частот при 3-кратной величине срт, вплоть до 7-кратных срт.

Наиболее распространенные параметры расцентровки

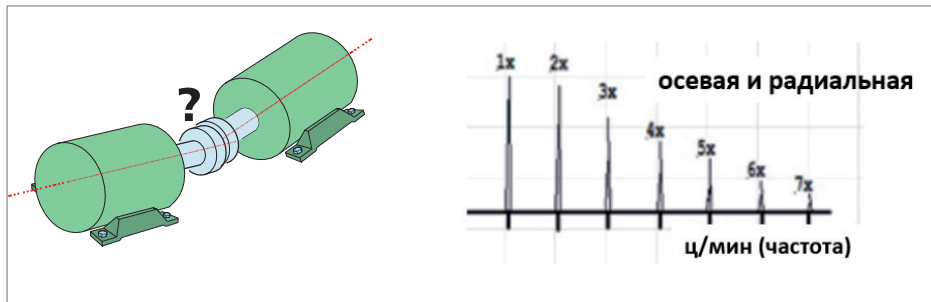
Параллельная расцентровка. Это состояние демонстрирует высокую радиальную вибрацию, со сдвигом 180 градусов по фазе, с радиальными вибрациями на 1-, 2-, 3- и 4-кратной частоте, основной пик на 2-кратной частоте, представляющий доминирующую амплитуду вибрации. Вертикальное и горизонтальное параллельное смещение демонстрируют один и тот же частотный шаблон.



Угловая расцентровка. Это состояние отличается высокой осевой вибрацией, изменением фазы на 180 градусов на муфте, осевой вибрацией при 1-, 2- и 3-кратной частоте с доминирующими пиками при 1- и 2-кратной частоте (любая из них может быть доминирующей амплитудой). Вертикальный и горизонтальный угол перекося характеризуются одинаковым частотным шаблоном.



Общая расцентровка. Это состояние является наиболее часто встречающимся видом расцентровки; оно представляет собой комбинацию параллельной и угловой расцентровки. Осевые и радиальные измерения показывают основные частотные составляющие с доминирующими частотами на 1- и 2-кратной частоте, с гармониками, достигающими 7-кратной величины срм .



ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ

Из всех компонентов, используемых во вращающейся машине, вероятно, наиболее распространенным компонентом, связанным с анализом вибрации, является подшипник качения. Базовая конструкция подшипника, состоящая из четырех компонентов, а именно: **наружной дорожки**, обоймы шарикового или роликового подшипника, **шариков** или **роликов** и **внутренней дорожки**, означает, что диагностика его неисправностей значительно сложнее, чем у многих других компонентов. Каждый компонент имеет четкую сигнатуру неисправности в спектре FFT. Чтобы идентифицировать сигнатуры неисправностей, причиной которых является подшипник, необходимо использовать ряд математических уравнений, чтобы установить основные частоты каждого компонента следующим образом.

Частота прохождения шарика по внутренней дорожке

$$\text{BPFI} = Z * n / (60 * 2) * (1 + (D_w / D_{pw} * \cos(a)))$$

Частота прохождения шарика по наружной дорожке

$$\text{BPFO} = Z * n / (60 * 2) * (1 - (D_w / D_{pw} * \cos(a))).$$

Частота вращения шарика

$$\text{BSF} = (D_{pw} * n) / (D_w * 60 * 2) * (1 - [D_w / D_{pw} * \cos(a)]^2)$$

Основная частота валопровода:

$$\text{FTF} = n / (60 * 2) * (1 - (D_w / D_{pw} * \cos(a)))$$

где

a = угол контакта

D_w = диаметр тела качения

D_{pw} = диаметр шага подшипника

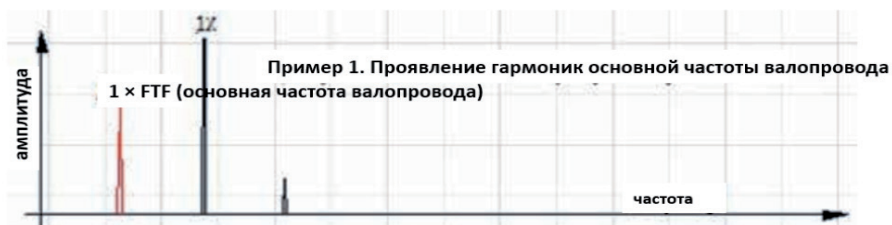
Z = число тел качения

n = частота вращения вала в об/мин

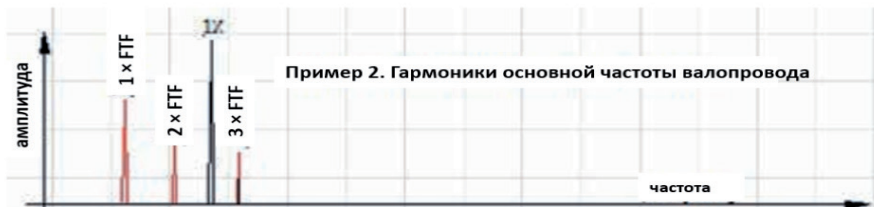
Количество шариков и размеры подшипника можно получить из каталога производителя подшипника. Кроме того, усовершенствованные анализаторы FFT, такие как VIBXPERT II, ввели в программное обеспечение основные частоты подшипников. Это достигается простым вводом в программное обеспечение номера модели подшипника, указанного производителем. Излишне говорить о том, что эта функция экономит значительное время при настройке и анализе состояния подшипника. Однако клавиша быстрого доступа отсутствует; эта информация необходима для правильной диагностики состояния подшипника с использованием спектров FFT.

Компоненты неисправности обоймы в спектре скоростей

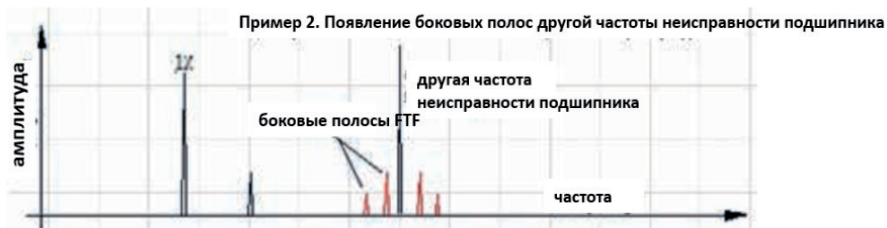
Разделение тел качения является основной функцией обоймы подшипника, которая обеспечивает безопасную работу при различных рабочих оборотах. Обойма уменьшает скольжение, контакт и износ тел качения. Обоймы облегчают равномерное распределение нагрузки по элементам в подшипнике, но не переносят никакой нагрузки. Дефекты обоймы могут появляться в спектре скорости в разных формах, в зависимости от состояния неисправности подшипника.



Основная частота только обоймы



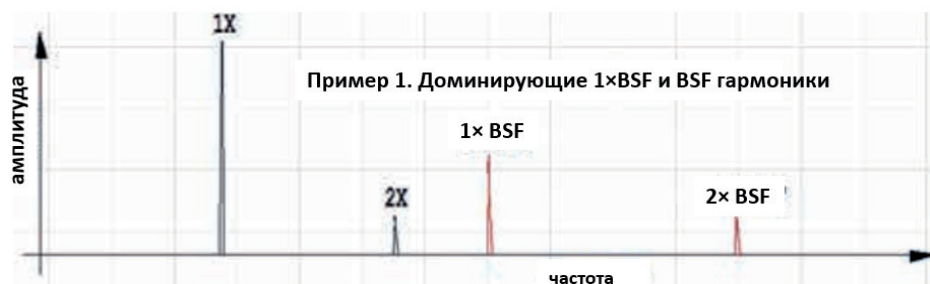
Основная частота и гармоники валопровода



Другая частота неисправности подшипника плюс боковые полосы

Компоненты неисправности роликов/шариков в спектре скоростей

Функция шарикового подшипника состоит в том, чтобы соединить между собой два элемента машины, которые перемещаются относительно друг друга, таким образом, чтобы сопротивление трения при движении было минимальным. В большинстве случаев один из элементов представляет собой вращающийся вал, а другой — неподвижный корпус. Для их разделения используются шарики или ролики, которые по сути представляют собой те компоненты подшипника, которые переносят нагрузку. Дефекты или повреждения этих тел качения показаны в спектрах FFT.



Доминирующая частота вращения шарика и гармоники ($2x \text{BSF}$)



Доминирующие гармоники вращения шарика ($2x \text{BSF}$)



Частота вращения шарика с боковыми полосами основной частоты валопровода

Компоненты неисправности внутренней и наружной дорожки на спектре скоростей

Внутренняя и наружная дорожки подшипников представляют собой два отдельных компонента подшипника. Каждая дорожка — это кольцо с канавкой, в которой находятся шарики. Как правило, форма канавки обеспечивает не совсем плотное размещение шарика в канавке. Таким образом, шарик соединяется с каждой дорожкой в одной точке. Однако нагрузка на маленькую точку вызовет чрезвычайно высокое контактное давление. На практике шар деформируется (становится немного плоским), когда он контактирует с каждой дорожкой, и дорожка тоже слегка вминается, когда каждый шарик нажимает на нее. В зависимости от нагрузки, посадки, проникновения частиц мусора и смазки внутренние или наружные дорожки могут получить неустраняемые повреждения. Такое повреждение отображается на спектре FFT рядом с основными частотами компонентов, вычисленными ранее.



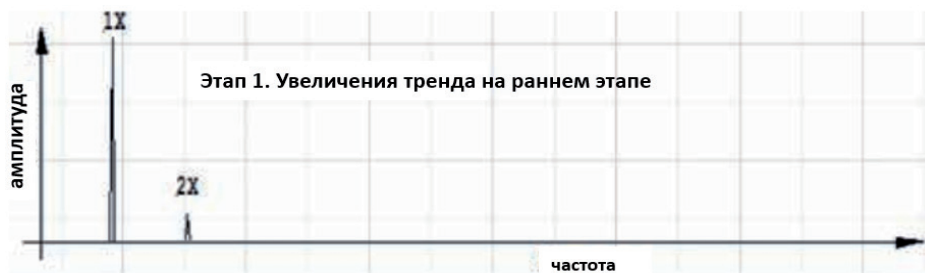
Спектр повреждений наружной дорожки с гармониками



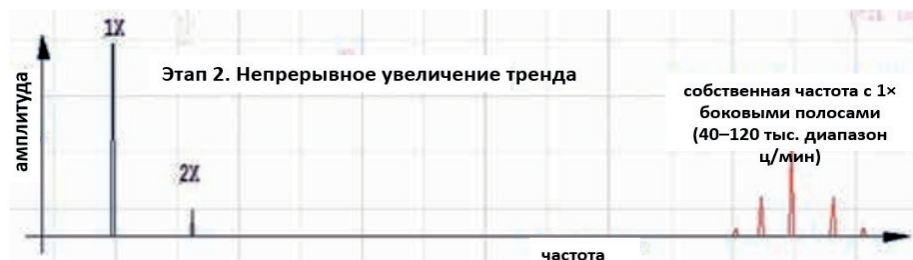
Спектр повреждений внутренней дорожки с гармониками

Этапы развития неисправности подшипника

Вышеприведенные примеры неисправности компонентов подшипника являются примером типовых спектров, которые могут быть обнаружены на поврежденном подшипнике. Однако более вероятно, что во время анализа подшипника возникнет прогрессирующее повреждение, которое со временем разовьется до такого состояния, при котором потребуются выполнение работ по предотвращению аварийных ситуаций. Как обсуждалось ранее, прогрессирующее повреждение выделено на графике трендов измерений. Тем не менее полезно во время оценки этого тренда определить причину повреждения и выполнить корректирующие действия для продления срока службы подшипника. Поэтому на различных этапах графика тренда полезно просматривать спектры FFT подшипника. На следующих примерах показаны четыре типичных этапа отказа.



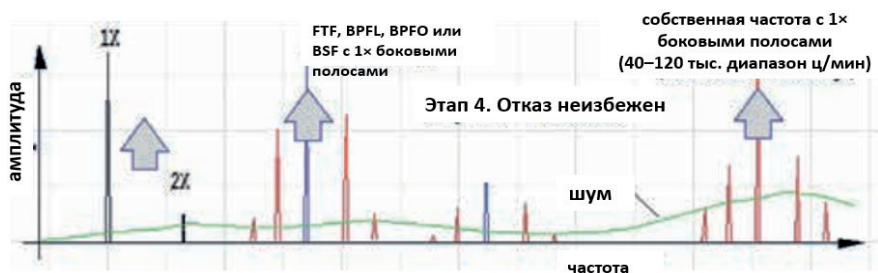
Спектр увеличения тренда на раннем этапе



Спектр непрерывного увеличения тренда: этап выполнения работ по предотвращению аварийных ситуаций



Повреждение с быстро нарастающим трендом: рекомендуется выполнить работы по предотвращению аварийных ситуаций



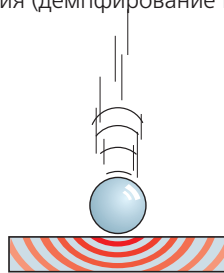
Быстро нарастающий тренд: отказ неизбежен

До определенной степени подразумевается, что необходимо попытаться выполнить работы по предотвращению аварийных ситуаций, прежде чем ситуация достигнет этапа 4 спектра. Конечно, не всегда возможно отключить критическое производственное оборудование. В таких обстоятельствах следует опираться на скорость увеличения и амплитуду графика тренда, а также измеренные спектры. **ОДНАКО** всегда помните о том, что катастрофический отказ подшипника, как правило, не начинается и заканчивается просто неисправностью подшипника. Результатом невыполнения работ по предотвращению аварийных ситуаций при обнаружении явно поврежденного подшипника могут стать изогнутые валы, повреждение муфты и целый ряд дополнительных неисправностей основных компонентов.

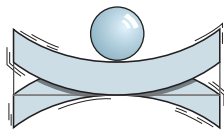
Оценка ударного импульса

Существует один метод, не использующий FFT, который широко применяется для оценки рабочего состояния антифрикционных подшипников. Это один из самых успешных и популярных методов, и он заслуживает упоминания в этом разделе FFT только из-за того, что он считается основным видом анализа для небольших подшипников, где общее состояние используется в качестве определяющих критериев для остановки машины и замены подшипников. Это **оценка ударного импульса**.

Ударные импульсы представляют собой особый тип вибрации, который необходимо четко отличать от обычных вибраций машины. Фактический ударный импульс — это волна давления, генерируемая в тот момент, когда один металлический объект ударяет по другому. Однако основная часть ударного импульса уходит на деформирование целевого объекта, который затем вибрирует на своей собственной частоте. В конечном счете эта вибрация рассеивается главным образом в виде тепла, из-за внутреннего трения (демпфирование в материале).



Ударный импульс



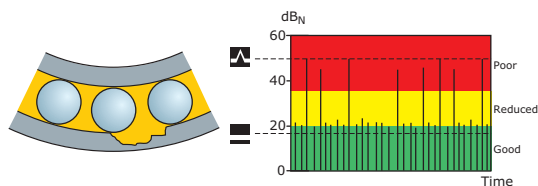
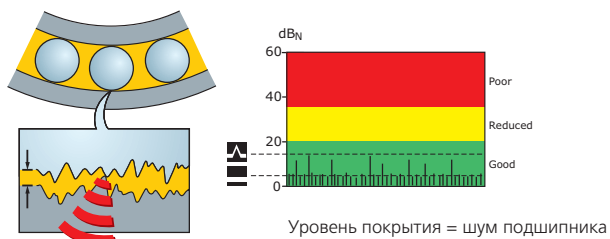
Волна деформации

Ударные импульсы возникают во время работы подшипника, когда тело качения проходит по неровности поверхности дорожки подшипника. В реальной жизни не существует совершенно гладких поверхностей. Даже совершенно новые подшипники быстро начинают генерировать сигналы слабых ударных импульсов. Этот «уровень покрытия» возрастает, когда смазочная пленка между телами качения и их дорожками истончается.

Дефект (вмятина или трещина) на поверхности тела качения или дорожки подшипника создает сильный ударный импульс с интенсивностью, которая до 1000 раз превосходит уровень покрытия. Такие нерегулярные пики («максимальное значение»), которые четко выделяются из фонового уровня, являются идеальными индикаторами повреждения подшипника.

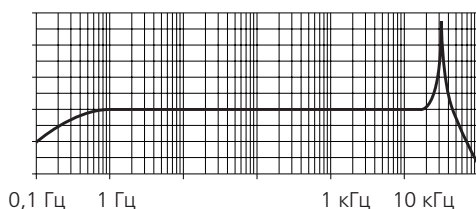
Ударные импульсы распространяются в значительно более высокочастотном диапазоне, чем для обычных вибраций машины, а их энергетическое содержание намного слабее. Поэтому акселерометр, используемый для измерения ударных импульсов, имеет резонансную частоту (около 36 кГц), которая находится именно в этом диапазоне.

Диаграммы ударных импульсов для исправных и поврежденных подшипников



Пики сигналов выше уровня покрытия. Уровень сигнала показан в децибелах (логарифмическая шкала) для ясности. 60 дБ представляет изменение в 1000x

Соответственно, в этом высокочастотном диапазоне, представляющем особый интерес для оценки состояния подшипника, преобразователь особенно чувствителен к сигналу ударного импульса, даже если на более низких частотах (например, из-за дисбаланса или расцентровки вала) происходит более сильная вибрация машины или она передается от смежных машин. Поскольку высокочастотные сигналы имеют тенденцию к быстрому рассеянию, то помехи на соседних подшипниках являются очень незначительными.



Оценка состояния подшипника

Как и для других методов оценки состояния, метод ударных импульсов позволяет получить выводы путем использования определенных параметров. На эти выводы влияют такие факторы, как размер подшипника, число об/мин, демпфирование сигнала и смазка. Как правило, значение ударного импульса следует сравнивать со значениями «сигнатуры», снятыми в тот момент, когда состояние известно как хорошее или нормализованное для учета этих факторов.

На протяжении многих лет были разработаны надежные методы нормализации, основанные на обширных измерениях и позволяющие рассчитать влияние размера подшипника и числа об/мин на показания ударных импульсов для новых идеальных подшипников. Нормализованный уровень сигнала (dB_n), рассчитанный для реального подшипника, позволяет оценить его состояние как «хорошее», «ухудшенное» или «плохое».

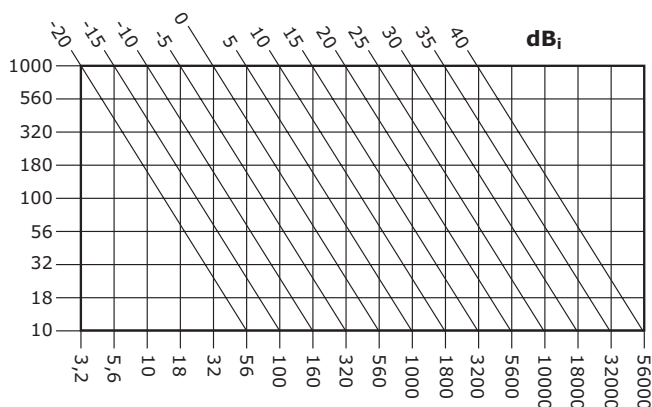


График нормализации показывает взаимосвязь диаметра подшипника и оборотов машины

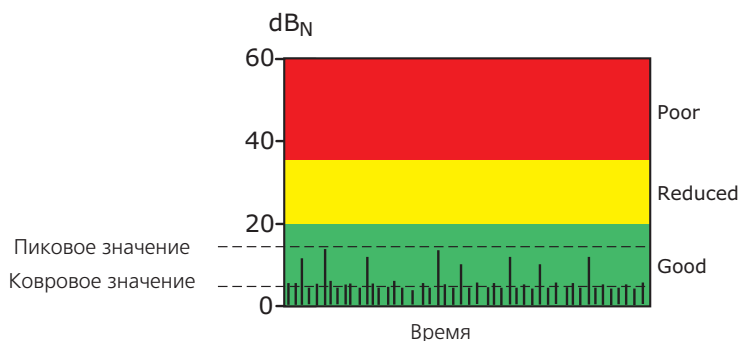
Для определения состояния подшипника используются два нормализованных параметра.

- ▶ **Значение покрытия** указывает на ухудшенное или плохое рабочее состояние (например, вызванное недостаточной смазкой, расцентровкой вала или неправильной установкой).

Напротив, поврежденные элементы подшипника генерируют отдельные ударные импульсы большей интенсивности.

- ▶ Результирующее **максимальное значение** является прямой индикацией рабочего состояния подшипника.

Конкретные типы повреждений могут быть распознаны не только по амплитуде абсолютного сигнала, но также по разнице с уровнем покрытия и распределением импульсов. Зачастую сравнение с типичными диаграммами ударных импульсов четко указывает на место возникновения проблемы (например, «загрязнение смазочных материалов»).

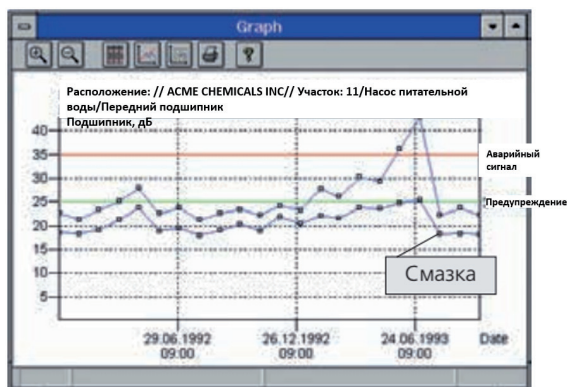


Сравнительная таблица ударных импульсов

На приведенной выше диаграмме показан типичный график ударного импульса, при котором состояние подшипника со временем изменилось. Верхняя линия графика представляет нормализованное общее значение dB_N состояния подшипника, а нижняя линия соответствует значению уровня покрытия dB_c . Как можно увидеть, тренды нормализованного уровня и уровня покрытия будут одинаковы для подшипников в хорошем рабочем состоянии. Начало развития проблемы будет обозначено точкой, когда тренды уровней начнут разделяться, например при увеличении тренда dB_N (верхнего). Увеличение уровня dB_c (покрытие) указывает на возможное ухудшение смазочной пленки, эту проблему часто можно устранить смазкой.

Тренд dB_c предоставляет важную информацию о состоянии смазки, монтаже и нагрузке подшипника. Он непосредственно связан с толщиной жидкой пленки на границе взаимодействия тел качения.

Тренд dB_N выдает информацию о неровностях на поверхности подшипника, которые приводят к возникновению одиночных ударных импульсов со случайными интервалами. Высокие значения являются надежным признаком повреждения, уже имеющегося на подшипнике, и общего состояния.



Типичный график трендов ударных импульсов

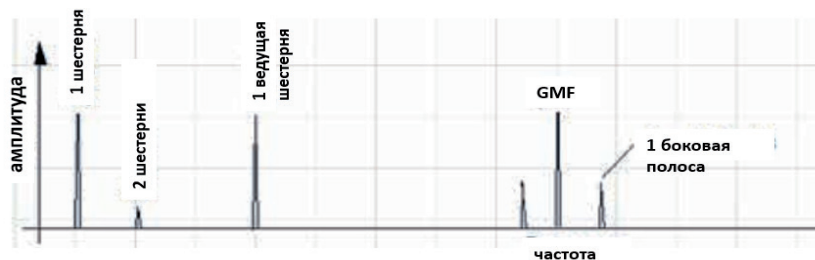
Если после смазки значение dV_c падает ниже аварийных уровней и остается там, это является хорошим показателем того, что выполнение работ по предотвращению аварийных ситуаций в виде смазки привело к возврату состояния подшипника в допустимые рабочие пределы. Если увеличение dV_n до уровня выше трендов dV_c , это указывает на то, что проблема является более серьезной и ее вряд ли можно решить простой смазкой.

НЕИСПРАВНОСТИ ШЕСТЕРНИ И РЕДУКТОРА

Редукторы, а более конкретно — зубчатые пары и проблемы износа, занимают значительное место в анализе вращающихся механизмов. Сложная конструкция редуктора, системы планетарных редукторов и анализ ошибок могут стать затруднением для инженера по мониторингу состояния, независимо от уровня его подготовки или опыта. Данная публикация не предназначена для слишком глубокого проникновения в анализ редукторов и сложный анализ неисправностей, который может потребоваться. Вместо этого мы рассмотрим типичный спектр системы редуктора в хорошем состоянии и имеющей три типичные и относительно легко обнаруживаемые проблемы.

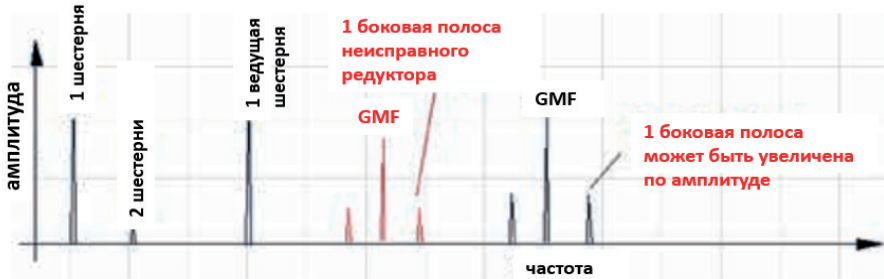
- ▶ Чрезмерный износ зубчатого колеса
- ▶ Чрезмерная нагрузка на зубья шестерни
- ▶ Механическая расцентровка между шестернями

На следующих четырех графиках спектров показаны основные спектры FFT, которые можно ожидать, учитывая эти проблемы.



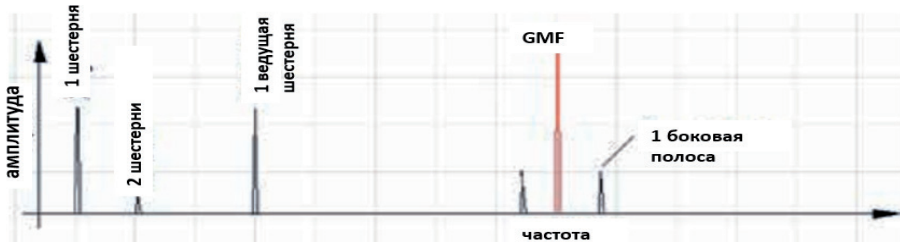
Ожидаемый спектр для редуктора в хорошем состоянии

На этом спектре показаны 1- и 2-кратные частоты шестерни плюс 1-кратная частота ведущей шестерни и частота вибраций зубчатой пары (GMF) с 1-кратными боковыми полосами частот. На дисплее отсутствуют собственные частоты редуктора и все пики имеют низкую амплитуду.



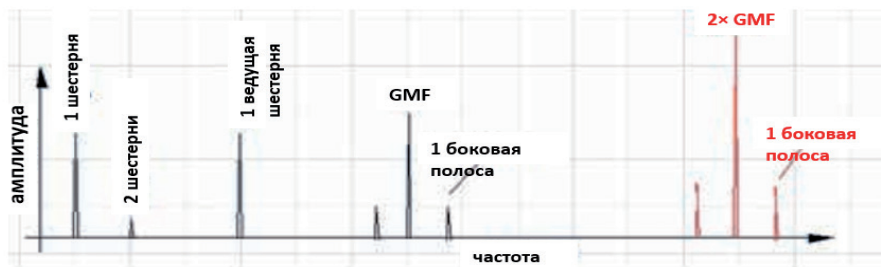
Спектр редуктора с изношенными зубьями

На спектре выше показан износ зубьев, который вызывает возбуждение собственной частоты редуктора с 1-кратными боковыми полосами неисправного редуктора. Боковые полосы собственной частоты редуктора могут быть увеличены по амплитуде. Другие частотные составляющие аналогичны тем, которые можно увидеть на спектре исправного редуктора.



Спектр редуктора с чрезмерной нагрузкой

Высокая нагрузка на зубья шестерни приведет к увеличению амплитуды частоты вибраций зубчатой пары (GMF) и очень малому изменению амплитуды боковой полосы частот.

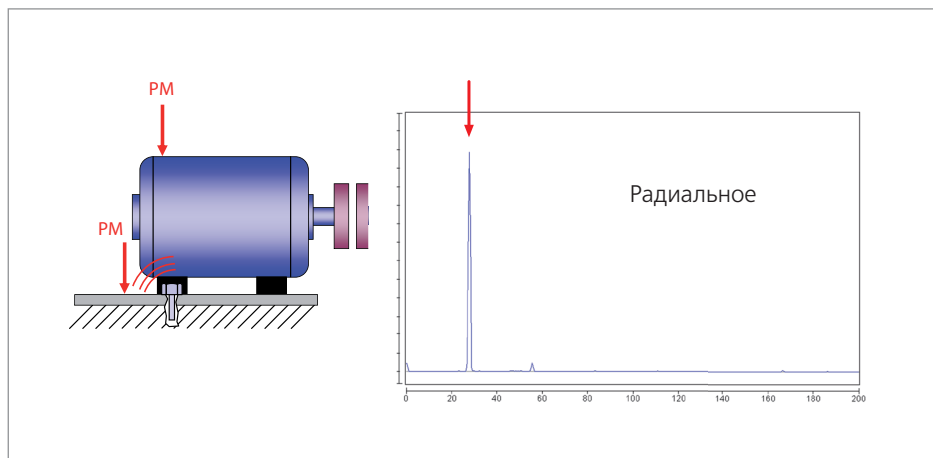


Спектр редуктора с чрезмерной расцентровкой

В этом примере расцентровка шестерни возбуждает 2-ю гармонику частоты вибраций зубчатой пары (GMF), а в некоторых случаях — даже 3-ю гармонику. 1- и 2-кратная частоты ниже по сравнению с 2-кратной частотой GMF.

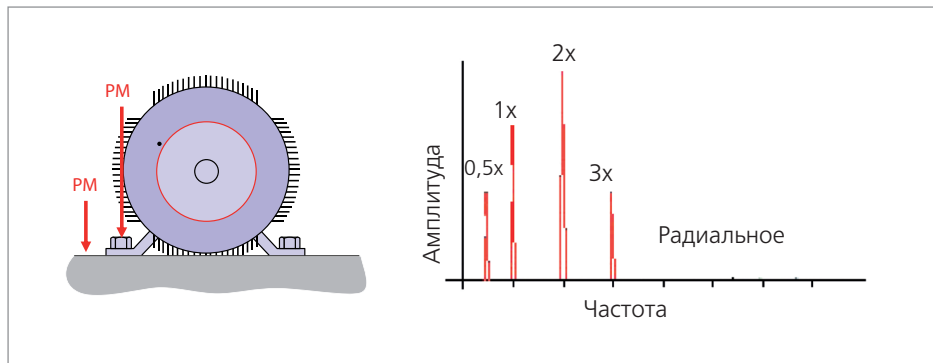
АНАЛИЗ НЕИСПРАВНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ

Ослабление компонентов, слабая конструкция, трещины или сломанные крепежные болты и плохое состояние фундамента могут создать бесчисленное множество проблем для инженера, анализирующего данные FFT. Зачастую бывает сложно определить это состояние из спектров, поскольку оно часто проявляется в виде других общих неисправностей, таких как дисбаланс или даже расцентровка. Глаза пользователя являются ключом к расшифровке диагностики FFT по ослаблению. Всегда ищите любые очевидные проблемы, такие как сломанная опора. Это значительно облегчает диагностику. Далее показаны три типичных спектра ослабления.



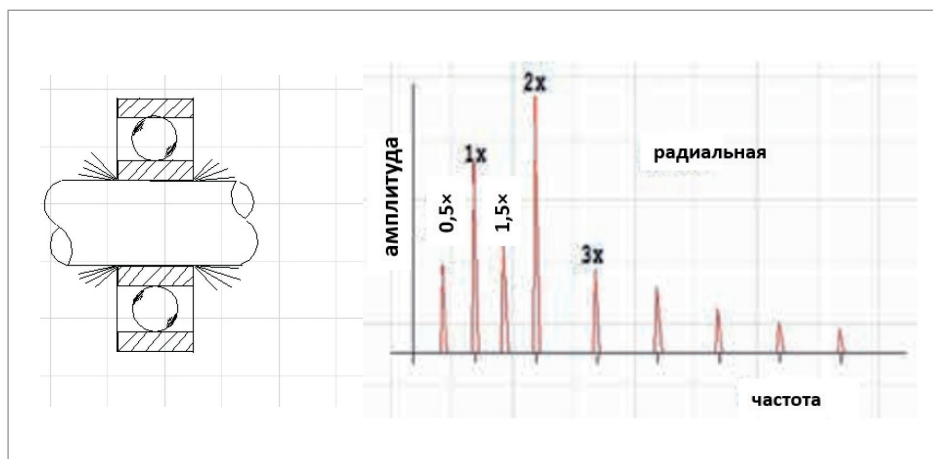
Ослабление конструкции

Ослабление конструкции вызвано ослаблением компонентов машины, как правило, механической неплотно прилегающей опорой, деформацией опорной плиты или фундамента или даже плохой конструкцией опорной плиты, которая создает изгиб опорной плиты. Такое ослабление проявляется в виде сильного 1-кратного компонента, измеренного в радиальном направлении и, следовательно, часто ошибочно диагностируется в качестве статического дисбаланса.



Механическое ослабление, вызванное ослабленными крепежными болтами

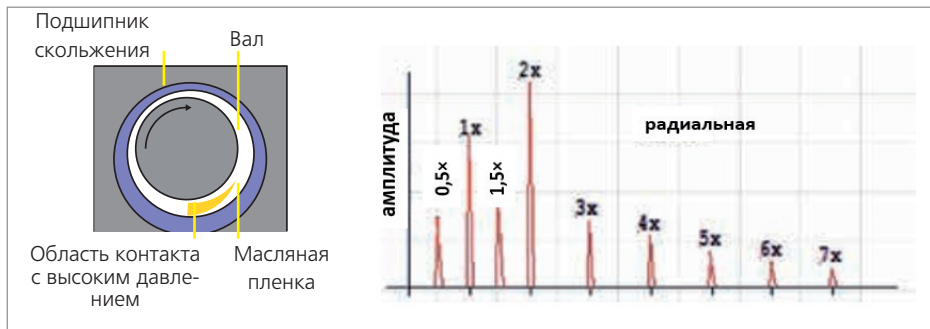
Этот тип ослабления можно легко идентифицировать путем наблюдения, проверки наличия ослабленных болтов, треснувших или сломанных опор машины, которые можно определить по значениям при 0,5-, 1-, 2- и 3-кратных срт, измеренным в радиальном направлении.



Ослабление, вызванное плохо установленными компонентами

Ослабление компонентов может быть вызвано плохой установкой подшипников или чрезмерным зазором крыльчаток вентиляторов на валу. Между двумя измерениями может происходить изменение фазы, генерируя многочисленные гармоники при 1-, 2- и 3-кратных частотах; кроме того, в спектре могут присутствовать 0,5-, 1,5-, 2,5-кратные составляющие.

Износ коренного подшипника также будет проявляться в виде механического ослабления.

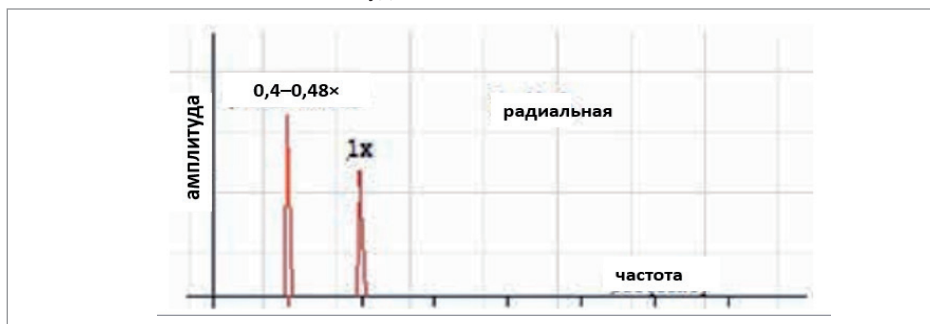


Износ коренного подшипника

Показания вибрации для определения износа коренных подшипников могут быть сняты с вала или корпуса подшипника. Сгенерированный спектр FFT очень похож на характеристику ослабления компонентов с 1-кратным компонентом плюс множество гармоник в спектре радиальной вибрации. В очень тяжелых случаях могут проявляться пики при 0,5-, 1,5-кратных значениях и т. д. Наиболее точными способами определения фактического износа коренных подшипников являются анализ масла и анализ продуктов износа.

Износ коренного подшипника зачастую вызван **завихрением масла**, которое возникает в том случае, когда клин смазки не может образовываться в зонах с тесным касанием компонентов сборки, но вместо этого образуются завихрения вокруг подшипника. Это завихрение приводит к прямому контакту двух металлов между валом и подшипником и быстрому износу подшипника.

В спектре появляются несинхронные компоненты в диапазоне 0,4- и 0,48-кратных значений с нестабильной амплитудой.



Завихрения масла на коренном подшипнике

РЕМНИ И ШКИВЫ

В процессе работы гибкий ремень во время своего вращения вокруг шкива испытывает три типа натяжения.

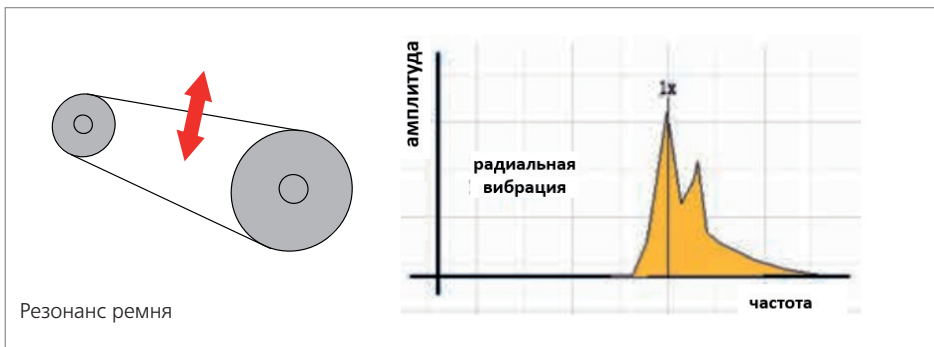
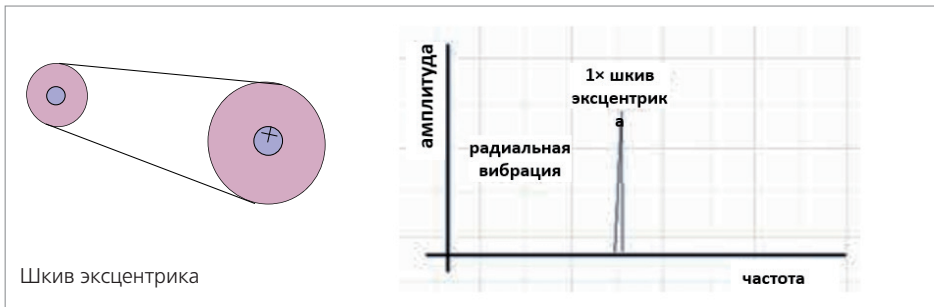
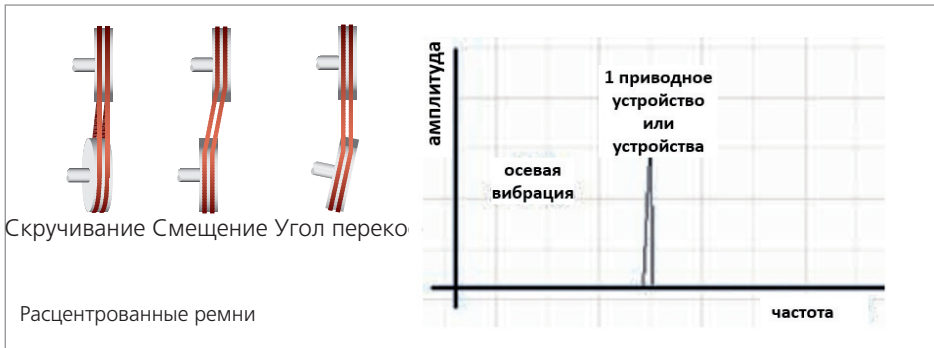
- ▶ Рабочее натяжение (сторона сильного натяжения — сторона слабого натяжения)
- ▶ Растяжение при изгибе
- ▶ Центробежное натяжение

Ремни предназначены для выдерживания этих рабочих состояний (при условии что предварительный выбор ремня соответствует рабочим критериям). Срок службы ремня будет соблюден и даже превышен при условии, что в течение срока службы на ремень не будут действовать никакие другие силы, помимо вышеуказанных.

Силы, такие как расцентровка и ослабление или чрезмерное натяжение ремня, разрушают гибкие ременные приводы. Плохая центровка шкивов может сократить полезный срок службы до 80 %. Кроме того, отсутствие должного внимания к основным требованиям по установке может привести не только к износу ремня, но также к повреждению шкивов, подшипников и уплотнений. Анализ FFT может помочь в определении многих «разрушителей ременного привода». Следующие примеры дают представление о том, что необходимо искать при анализе спектров ременного привода.



Изношенные, ослабленные или перекошенные ремни

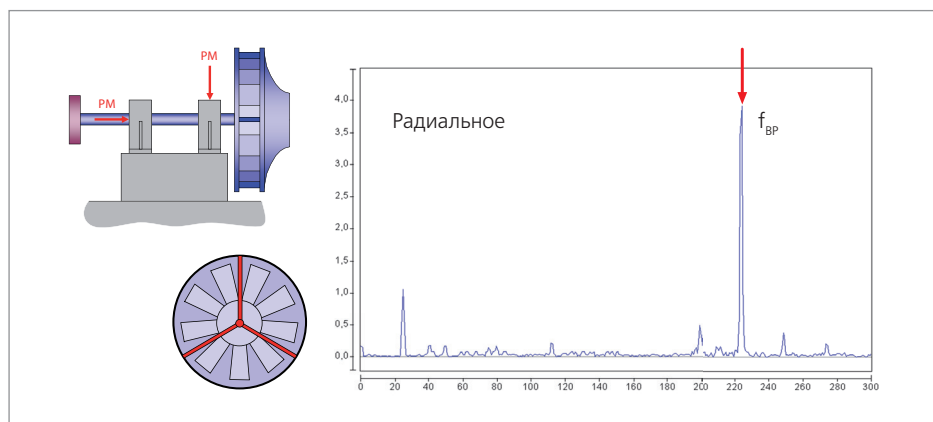


Резонанс ремня возникает в том случае, когда собственная частота ремня приближается или совпадает с частотой приводного или приводимого вала. Чтобы устранить эту проблему, измените натяжение ремня, чтобы поменять собственную частоту ремня.

ВЕНТИЛЯТОРЫ

Большинство вентиляторов, с которыми мы сталкиваемся в стандартных технологических процессах, относятся к лопастному или центробежному типу. Такие вентиляторы склонны к неравномерному накоплению мусора на лопастях, особенно при работе с воздухом, засоренным частицами, в таких местах, как мастерские для покраски автомобилей. Накопление частиц приводит к дисбалансу вентилятора. Анализ FFT позволяет быстро выявить такие проблемы эксплуатации. Зачастую вентиляторы оснащены ременным приводом, что также приводит к появлению типичных характеристик FFT для ременного привода, как описано на предыдущих страницах.

Однако если обнаруженные во время анализа дисбаланс и расцентровка могут быть устранены с устранением повышенных показаний FFT для вентилятора, то существует вероятность того, что неисправность вентилятора возникла в результате какого-то механического повреждения. Оно может варьироваться от чрезвычайной проблемы, такой как отсутствие лопасти, до треснувшего или сколотого кончика лопасти. Для проведения FFT-исследования этой проблемы необходимо, чтобы аналитик знал частоту прохода лопастей (f_{BP}) вентилятора. Расчет является достаточно простым; здесь необходимо всего лишь умножить количество лопастей на число оборотов самого вентилятора.



$$f_{BP} = B_n * N$$

B_n = число лопастей

N = частота вращения ротора в об/мин

Пример расчета вентилятора с 9 лопастями и 3 опорными стойками на впускном корпусе

3 стойки на входе $x = 3$

9 лопастей $B_n = 9$

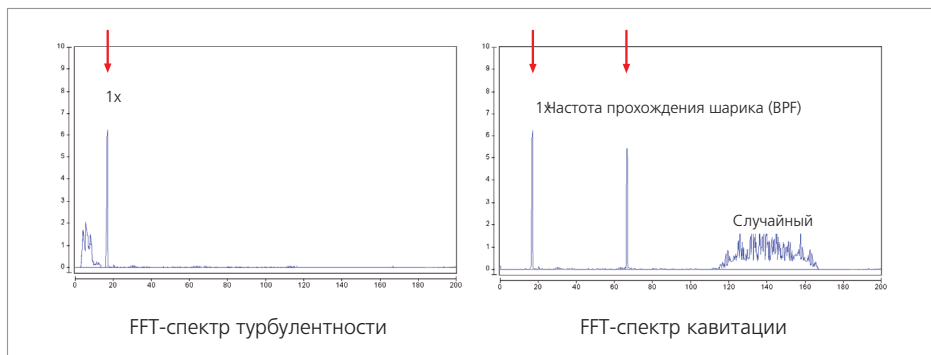
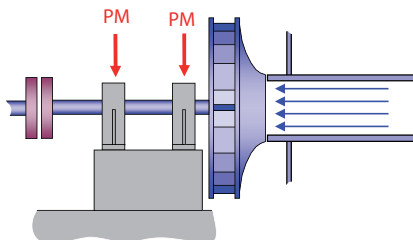
Частота вращения ротора $N = 600$ об/мин

$$f_{BP} * x = N * B_n * x = 600 * 9 * 3$$

Характеристическая частота = 16 200 цикл/мин

Аэродинамические и гидравлические силы

Эта проблема может затрагивать узлы вентиляторов и насосов, она связана с движением жидкости и воздуха через конструкцию. Проблемы могут быть классифицированы в качестве кавитации или турбулентности. Как можно видеть в следующих примерах, обе неисправности предлагают различные спектры FFT.



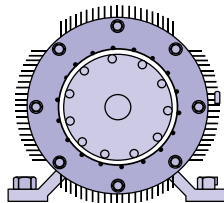
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Вероятно, самым распространенным оборудованием в любой технологической установке являются электродвигатели. Они обеспечивают движение почти каждой детали, поэтому, рассматривая их как отдельный элемент оборудования, необходимо учитывать электромеханические неисправности, которые могут возникать в результате их работы. Само собой, поскольку они постоянно соединены с другим компонентом (вентилятором, насосом и т. д.), то они подвержены таким же основным неисправностям компонентов, т. е. дисбалансу, расцентровке, ослаблению, проблемам с подшипниками и т. д. (рассмотрено ранее в этом разделе). Однако электродвигатели являются достаточно сложными устройствами и могут иметь электромеханические проблемы, которые совершенно уникальны для них.

По существу, двигатели состоят из статора (слоистые стальные профили или стержни, обмотанные медной проволокой) и ротора (те же слоистые стальные профили или стержни, обмотанные медной проволокой). Ротор имеет опору в виде подшипников и отделен от статора воздушным зазором заданного размера. Два основных типа двигателей — синхронные и асинхронные двигатели. Они отличаются тем, что синхронный двигатель имеет постоянно намагниченный ротор, который вращается с помощью статора, «тянущего» его с помощью магнитного притяжения. Асинхронный двигатель отличается тем, что ротор является не постоянным, а электрическим магнитом. Это определяется конструкцией ротора со стержнями ротора, встроенными в пластины. Стержни ротора соединены друг с другом на каждом конце с помощью сплошного медного кольца. Асинхронный двигатель работает под действием магнитного отталкивания, а не притяжения, как в случае синхронного двигателя. Однако оба устройства подвержены сходным электромагнитным неисправностям.

Если вы подозреваете, что двигатель имеет электромагнитные неисправности, в первую очередь необходимо отключить двигатель от ведомого компонента и провести анализ FFT для отдельно работающего двигателя. Проблемы с электродвигателями можно условно классифицировать следующим образом.

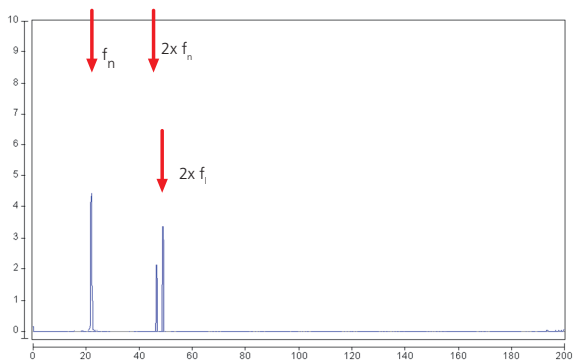
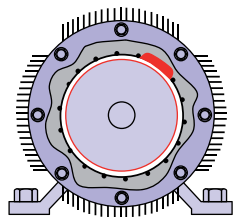
- ▶ Эксцентриситет статора
- ▶ Эксцентриситет ротора
- ▶ Проблемы с ротором
- ▶ Ослабленные соединения



Эксцентриситет статора

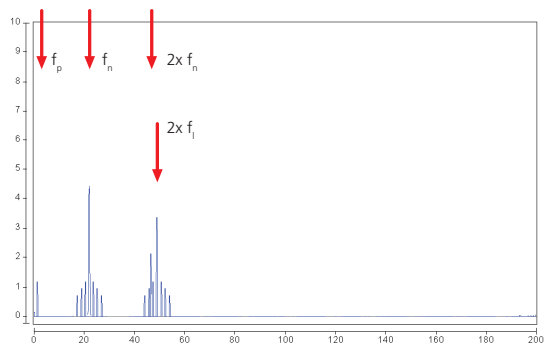
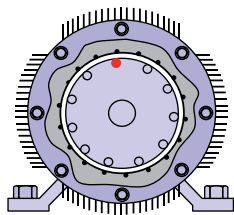
Вызван ослаблением сердечника (пластин), закорачиванием пластин статора и неплотно прилегающей опорой.

Высокий уровень сигналов $1x f_n$ и $2x f_n$; сигналы $2x f_l$ (двойная линейная частота) без боковых полос. Преобладают радиальные измерения. При измерении следует использовать настройки высокого разрешения.



Эксцентриситет ротора

Обычно вызван смещением ротора, расцентровкой и ненадежным основанием; сигналы f_p , $1x$, $2x$ и $2f_l$; сигналы $1x$ и $2f_l$ с боковыми полосами при f_p (частота прохождения полюсов). Преобладают радиальные измерения. При измерении следует использовать настройки высокого разрешения.



Основные параметры

Вибрация при удвоенной частоте сети:

$$2 * f_l$$

Частота зацепления сердечника:

$$f_{\text{bar}} = f_n * n_{\text{bar}}$$

Синхронная частота:

$$f_{\text{syn}} = 2 * f_l / p,$$

Частота скольжения:

$$f_{\text{slip}} = f_{\text{syn}} - f_n$$

Частота прохождения полюса:

$$f_p = p * f_{\text{slip}}$$

Где

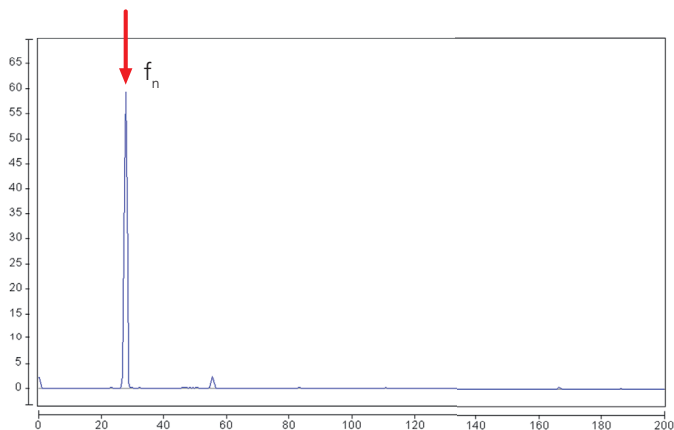
f_n — частота вращения

n_{bar} — количество стержней ротора

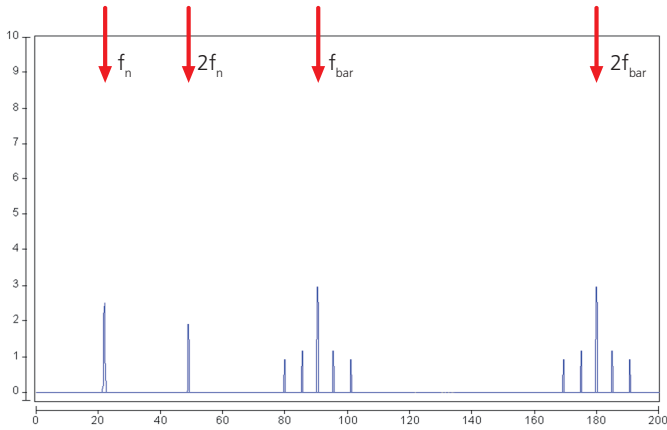
p — количество полюсов

Другие электромеханические неисправности

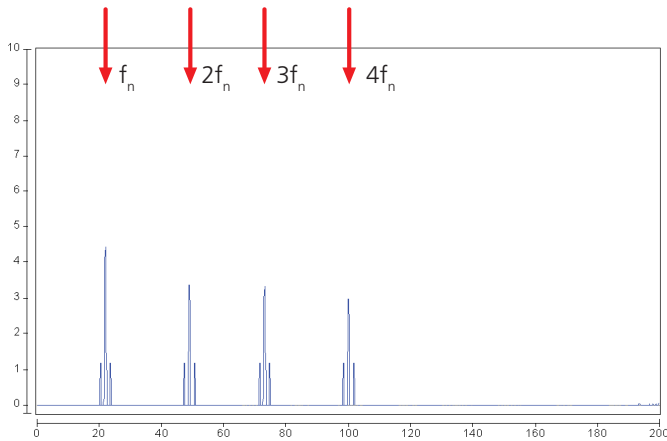
Неравномерный нагрев ротора из-за несимметричных токов стержня приведет к деформации ротора (изгибу). Это вызывает дисбаланс с характерной сигнатурой FFT. Неисправность можно определить по тому, как исчезают наблюдаемые признаки на холодном двигателе.



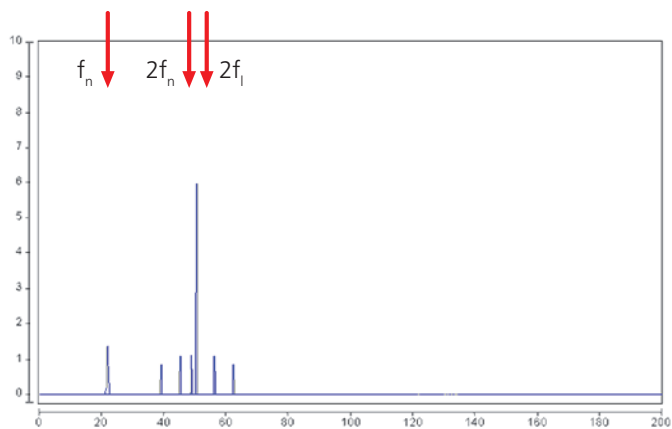
Изгиб ротора



Ослабленные стержни ротора: f_{bar} и $2f_{\text{bar}}$ с боковыми полосами $2f_1$; $2f_{\text{bar}}$ может быть выше; могут присутствовать 1- и 2-кратные частоты



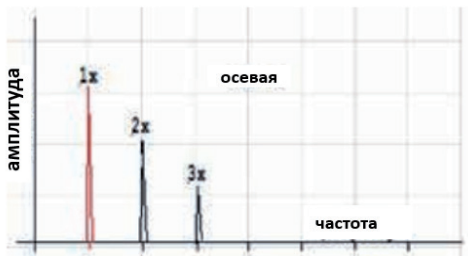
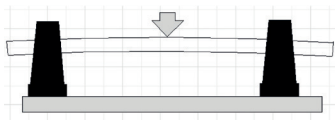
Трещины в стержнях ротора: 1-кратная частота и гармоники с боковыми полосами при f_p ; требуемый спектр высокого разрешения; возможный сигнал биения



Ослабленные соединения: чрезмерный сигнал при $2f_1$;
проблемы с фазой электрического тока; необходимо срочно устранить

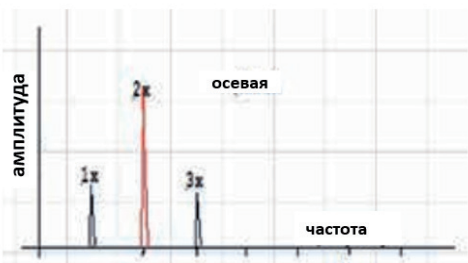
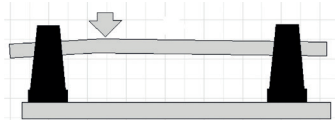
ИЗОГНУТЫЙ РОТОР ИЛИ ВАЛ

Вал, согнутый в центре



Согнутый вал генерирует высокие радиальные и осевые нагрузки. Осевая вибрация проявляется при компонентах 1-, 2- и 3-кратной частоты. Доминирующей является 1-кратная частота, если изгиб находится возле центра вала и существует фазовый сдвиг на 180 градусов в осевом направлении. При таком диагнозе необходимы измерения фазы.

Вал, согнутый с одного конца



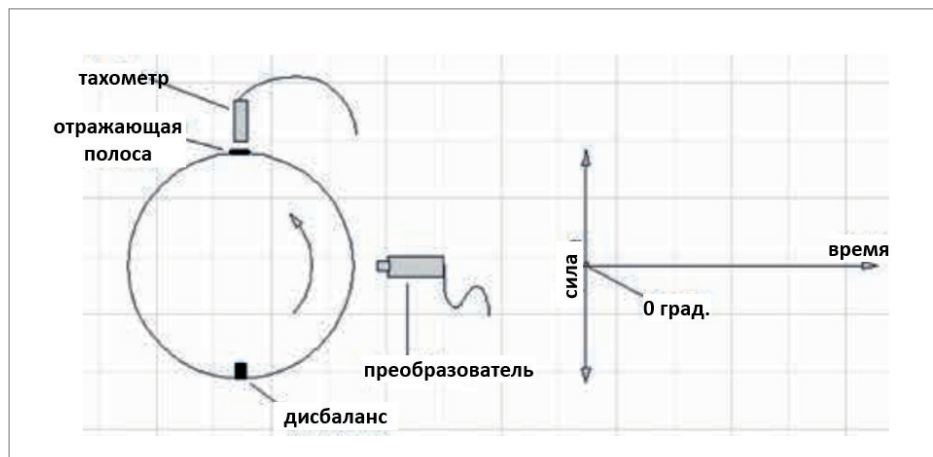
Согнутый вал генерирует высокие радиальные и осевые нагрузки. Осевая вибрация проявляется при компонентах 1-, 2- и 3-кратной частоты. Доминирующей является 2-кратная частота, если изгиб находится возле центра вала и существует фазовый сдвиг на 180 градусов в осевом направлении. При таком диагнозе необходимы измерения фазы.

ФАЗА

Измерения фазы являются очень полезным инструментом для диагностики некоторых общих состояний вращающейся машины, таких как расцентровка, дисбаланс или изогнутые валы. Поэтому необходимо иметь представление о методе измерения и о том, что вы на самом деле измеряете. Фаза является мерой разницы во времени между двумя синусоидальными волнами.

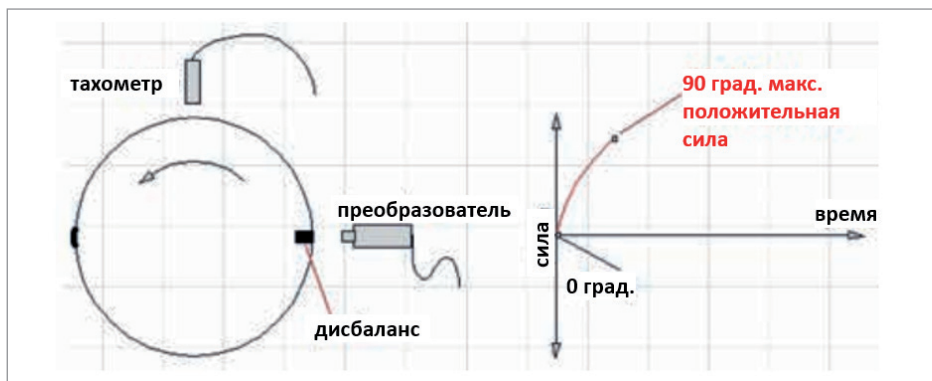
Для ясности мы используем в следующих примерах преобразователь вибрации для определения силы дисбаланса, светочувствительный тахометр («тахометр») и отражающую полосу, прикрепленную к валу, для определения положения вала.

Фазовый угол представляет собой угол в градусах, на который перемещается вал от момента начала сбора данных до того положения, когда преобразователь вибрации измеряет максимальную положительную силу дисбаланса.



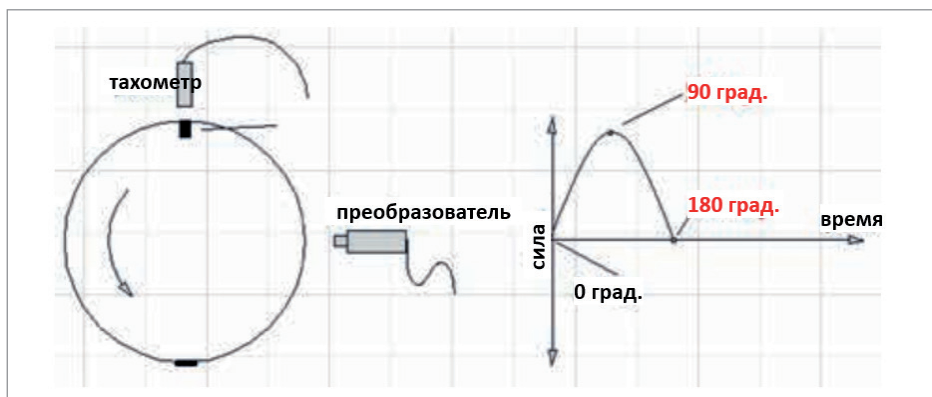
Вал в начале

Тахометр определяет отражающую полосу и начинает сбор данных. В этот момент фаза = 0.



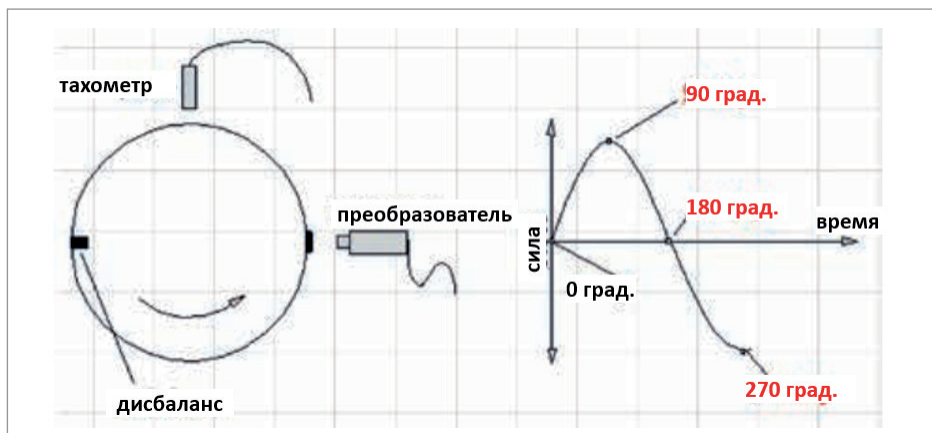
Вал повернут на 90 градусов

Сила дисбаланса повернута на 90 градусов. В этот момент сила дисбаланса создает максимальное положительное значение на преобразователе. Поскольку дисбаланс смещается в сторону преобразователя, его сила считается действующей в положительном направлении.



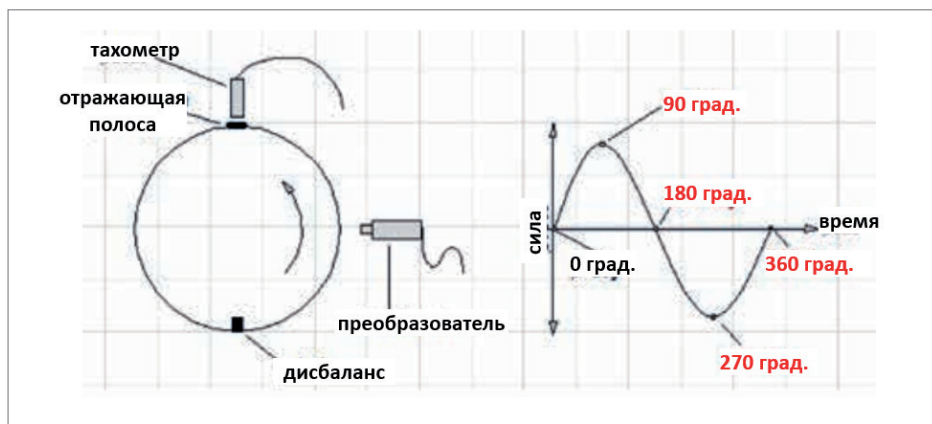
Дисбаланс перемещается еще на 90 градусов

Сила, действующая на преобразователь, равна нулю.



Дисбаланс перемещается еще на 90 градусов

Теперь дисбаланс расположен напротив преобразователя. В этот момент образовавшаяся сила имеет самое высокое отрицательное значение и направлена от преобразователя. Сила считается направленной в отрицательном направлении.



Дисбаланс перемещается еще на 90 градусов

Сила дисбаланса завершила оборот на 360 градусов, и сила, воздействующая на преобразователь, снова равна нулю.

В предыдущих примерах монтажный угол между преобразователем и тахометром для простоты показан равным 90 градусов. Это не является абсолютно необходимым условием. Устройства могут быть установлены в одной и той же плоскости или расположены под углом 180 градусов друг от друга. Основой метода является использование тахометра и преобразователя для инициализации и измерения фазового сдвига машины. Кроме того, в примерах используется простой статический дисбаланс для объяснения принципа измерения фазы.

Фаза является основным компонентом диагностики FFT. Зачастую без измерений фаз невозможно точно различить такие неисправности, как дисбаланс, расцентровка, изогнутые валы или другие низкочастотные проблемы, которые проявляются при 1-, 2- или 3-кратной основной частоте машины.

Устройства сбора данных и анализаторы вибраций компании PRUFTECHNIK

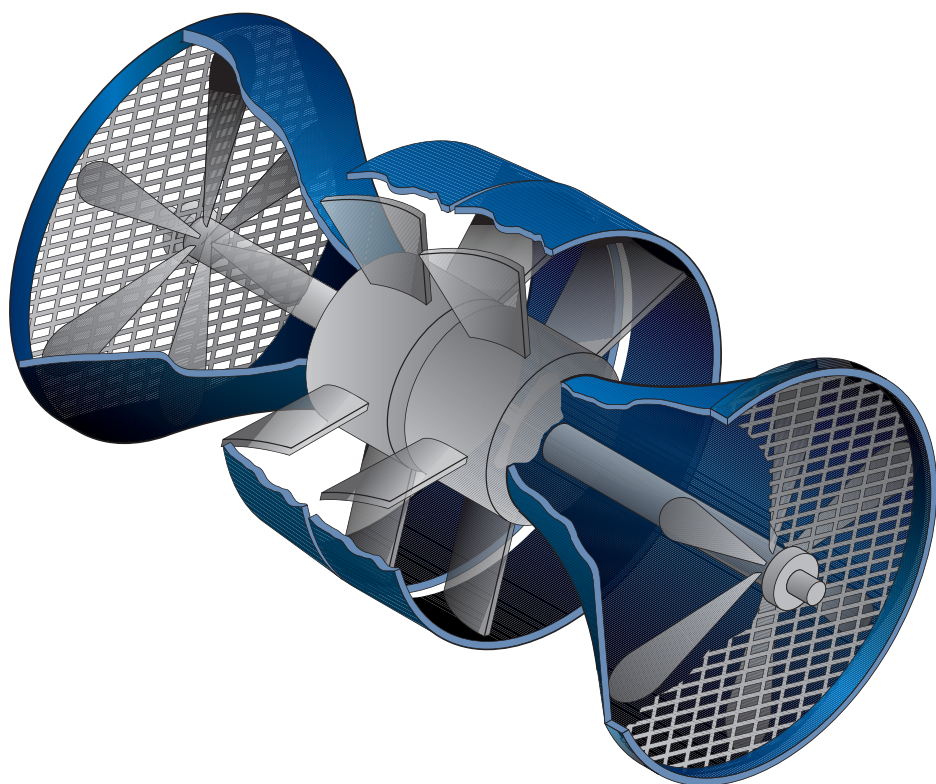
Все функции анализа вибрации и методы, описанные на предыдущих страницах, могут быть реализованы в системе VIBXPERT® II компании PRUFTECHNIK. По существу, система VIBXPERT® II представляет собой модульную систему, которая может быть сконфигурирована для выполнения ряда задач, связанных с вибрацией, включая следующие.

- ▶ Сбор данных по маршруту измерений
- ▶ Двухканальный анализ FFT
- ▶ Анализ формы сигнала времени
- ▶ Динамическая балансировка



Раздел 3

Динамическая балансировка



Стандарты балансировки

В соответствии со стандартом ISO 1940 — 1973 (E)

«Балансировка — это процесс, связанный с попытками улучшить распределение массы тела таким образом, чтобы оно вращалось на своих подшипниках без воздействия несбалансированных центробежных сил».

В этом руководстве мы хотим рассмотреть стандарты балансировки для простых вращающихся машин с жесткими роторами и то, как, используя расчеты и портативные системы балансировки, такие как PRUFTECHNIK VIBXPERT® II Balancer, можно обеспечить достижение этих стандартов балансировки. Как и в случае центровки вала, балансировка вращающихся машин будет в значительной степени способствовать повышению надежности машины и, следовательно, повышению рентабельности производства.

В отличие от центровки валов, где при необходимости можно отрегулировать машину до состояния нулевой центровки, невозможно сбалансировать машины с нулевым дисбалансом. Даже после балансировки машины будут по-прежнему иметь некоторый остаточный дисбаланс. Используя современные системы, можно снизить дисбаланс машины до очень низких уровней. Однако для большинства стандартных машин неэкономично добиваться очень низких уровней дисбаланса. Решение о том, в какой мере следует уменьшить дисбаланс и как найти экономично обоснованный компромисс между достижением более низких уровней дисбаланса и принятием того, что было достигнуто, является субъективным. Однако стандарты ISO могут использоваться в качестве хорошего руководства для достижения приемлемых условий дисбаланса.

В стандартах использованы рабочее число оборотов станка и масса ротора, чтобы установить применимые ориентировочные уровни. Качество баланса классифицируется в диапазоне от G 0,4 до G 4000. Для большинства стандартных вращающихся машин, таких как вентиляторы, насосы и двигатели, необходимо рассматривать диапазон от G 6.3 до G1. В зависимости от индивидуальных условий эксплуатации установки и ввода в эксплуатацию некоторые установки будут соответствовать стандарту балансировки в этом диапазоне. Стандарт ISO не предполагает, что стандарты балансировки будут использоваться для определения условий приемочных испытаний для конкретных типов роторов. Они больше предназначены для использования в качестве индикации приемлемости дисбаланса, основываясь на опыте и оценке показателей работы машины в предшествующий период.

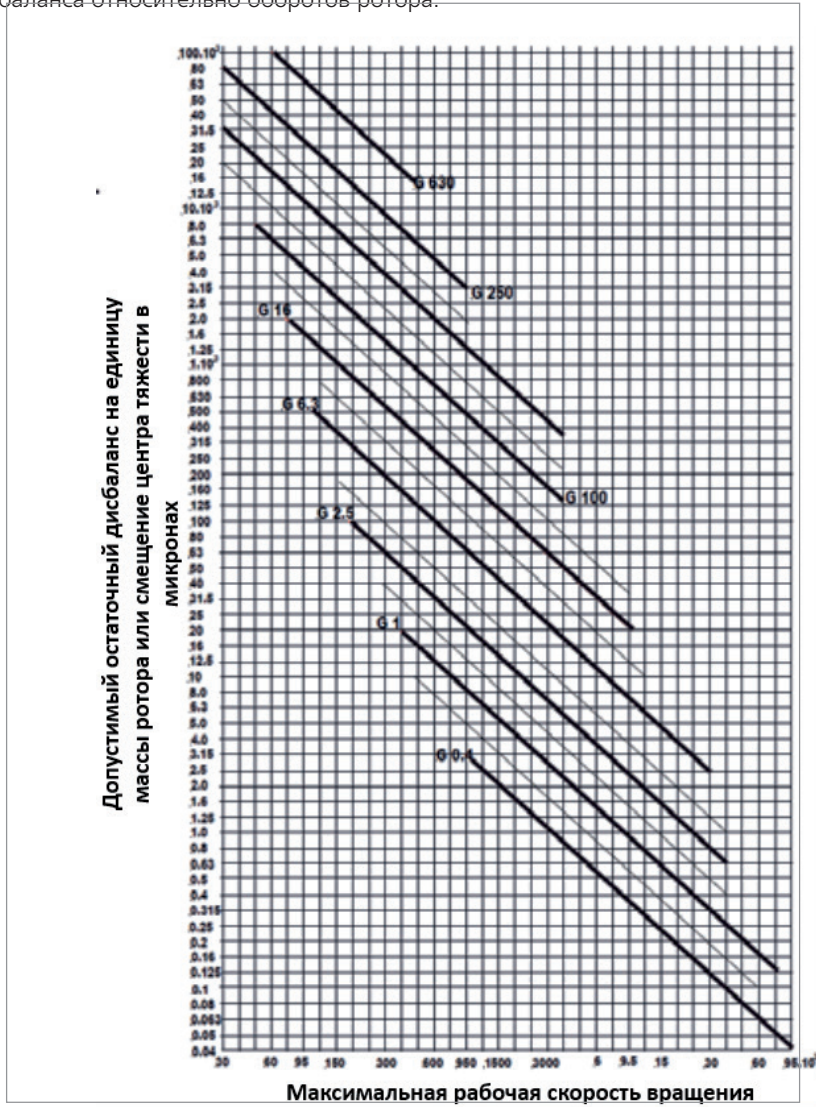
Как правило, чем больше масса ротора, тем выше допустимый дисбаланс. Допустимый дисбаланс **U** связан с массой ротора **m**, чтобы определить допустимый дисбаланс ротора в соответствии с принятой формулой.

$$e = U/m$$

Общая классификация стандартных машин согласно ISO 1940

Стандарт качества балансировки G	Примеры балансировки корпусов или машин
630	Жестко закрепленные четырехтактные двигатели с кривошипным механизмом и амортизированные судовые дизельные двигатели
250	Жестко закрепленные высокооборотные 4-тактные дизельные двигатели с кривошипным механизмом
100	Жестко закрепленные высокооборотные дизельные двигатели с шестью и более цилиндрами и кривошипным механизмом
40	Автомобильные колеса, ободья, колесные пары, кривошипный механизм приводного вала на упругих опорах, высокооборотные четырехтактные двигатели с шестью и более цилиндрами
16	Компоненты кривошипных механизмов автомобильных, грузовых и локомотивных двигателей, кривошипный механизм шести- и более цилиндровых двигателей со специальными требованиями
6,3	Вентиляторы, маховики, центробежные насосы, детали конструкции машин и металлорежущих станков
2,5	Крыльчатки реактивных электростанций, газовых и паровых турбин, турбоагнетателей и генераторов
1	Самописцы и звуковые приводы, шлифовальные машины
0,4	Точно отшлифованные якоря машин, валы и диски, гироскопы

Практический опыт показывает, что для роторов одного и того же типа допустимый удельный дисбаланс изменяется по мере изменения оборотов ротора. Такое изменение приводит к созданию диаграммы допустимого дисбаланса относительно оборотов ротора.



: ISO 1940-1973 (E)

На основе классов точности балансировки, указанных в справочной таблице, можно установить оценку приемлемости несбалансированного состояния ротора.

ISO 1940-1973 (E) предполагает, что при измерении и оценке качества балансировки ротора можно использовать следующий вариант: сравнение с таблицей стандартных значений.

Классы точности балансировки	Допустимое отклонение
G 2,5–G16	± 15 %
G 1	± 30 %
G 0,4	± 50 %

График на предыдущей странице представляет собой упрощенную версию графика из стандарта ISO. Жирным шрифтом выделены наиболее часто используемые классы точности балансировки для стандартных типов машин. Наиболее часто используемые классы точности балансировки для стандартных двигателей, насосов и вентиляторов находятся в диапазоне от 2,5 до 6,3. В исключительных случаях может использоваться класс 1.0. Однако такой класс балансировки является строгим стандартом для таких областей применения.

Прежде чем приступить к корректирующим действиям для устранения дисбаланса, необходимо исключить любые посторонние причины вибрации, такие как ослабление, трение или расцентровка. Анализ, описанный в предыдущем разделе, поможет установить первичный источник вибрации. Это необходимо учитывать в первую очередь.

МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ

В настоящее время в качестве основного метода коррекции дисбаланса ротора используется специально разработанная балансировочная машина или портативная балансировочная система, такая как VIBXPERT[™] II Balancer компании PRUFTECHNIK.

В данном руководстве не рассматриваются порядок использования статических балансировочных машин и доступные типы. Здесь мы ориентируемся на балансировку на месте эксплуатации, что выполняется с помощью большинства портативных систем. Однако полезно рассмотреть метод определения дисбаланса на месте без помощи специальной балансировочной системы. Это поможет установить основные требования к балансировке и, скорее всего, подчеркнет полезность инвестирования в систему балансировки, которая устраняет довольно сложные необходимые расчеты.

Балансировка на месте должна выполняться в нормальном режиме работы при нормальных оборотах. Если это невозможно из-за того, что дисбаланс становится чрезмерным и нормальная работа будет слишком опасной, предварительная балансировка должна сначала выполняться на пониженных оборотах, чтобы снизить степень вибрации, а затем уже производится окончательная балансировка на нормальных оборотах.

Точки на роторе, в которых фиксируются пробные и балансировочные веса в плоскостях балансировки, должны быть легко доступны. Демонтаж основных компонентов между пробными прогонами может изменить внешние воздействия таким образом, что результаты измерений отдельных прогонов уже не могут быть сопоставимы. Соответствующая точка измерения, идентичная для всех прогонов, должна быть идентифицирована в том месте, где прибор измерения уровня вибрации показывает наибольшее значение вибрации.

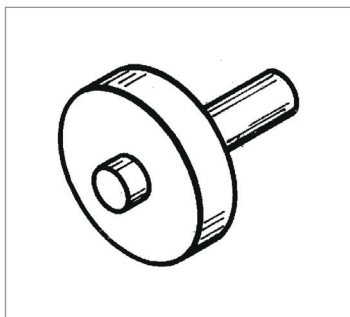
При выполнении любых процедур уровень вибрации может быть измерен в виде степени серьезности вибрации v_{eff} , амплитуды смещения s или амплитуды ускорения, \ddot{x} . Для простоты следующее обсуждение основано только на использовании v_{eff} , далее сокращенно v .

Как и в случае с колесами автомобилей, балансировка выполняется в основном путем добавления балансировочных грузов, реже — путем их удаления. Следовательно, проблема заключается в определении того места, где следует добавить балансировочный груз и какой должна быть его величина.

Существует несколько процедур для определения местоположения и величины балансировочных грузов. Однако в зависимости от геометрии ротора, который необходимо сбалансировать, существуют два основных метода коррекции дисбаланса ротора, которые будут рассмотрены далее.

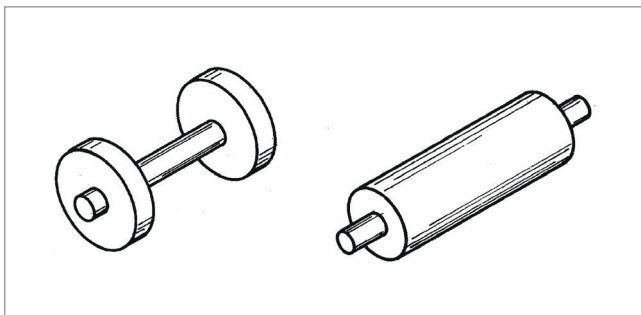
Балансировка в одной плоскости

Балансировка в одной плоскости предназначена для механических узлов, имеющих, по существу, один ротор, толщина которого меньше его радиуса, к таким относятся, например, большая часть вентиляторов, ременные шкивы или полумуфты. Для данного метода плоскость центра масс называется **плоскостью балансировки**.



Балансировка в двух плоскостях

Балансировка в двух плоскостях предназначена соответственно для использования на машинах, имеющих два или более ротора или один ротор, ширина которого превышает его радиус. При использовании данного метода две **плоскости балансировки** представляют левую и правую стороны или переднюю и заднюю стороны соответственно.



Балансировка в одной плоскости

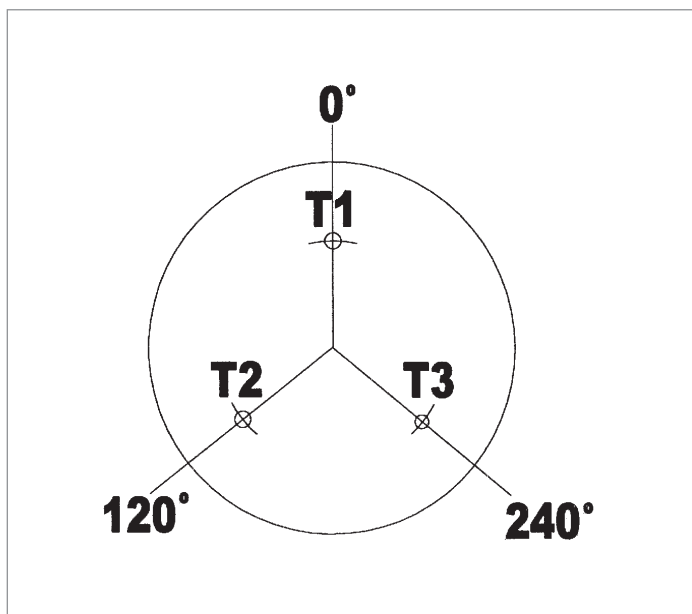
Для того чтобы определить положение балансировочного груза, ротор градуируют в градусах от 0° до 360° в направлении против часовой стрелки. Градуировка может быть нанесена на переднюю или на боковую поверхность ротора, в зависимости от того, где впоследствии будет добавлен балансировочный груз. Если крышка обеспечивает доступ к ротору только в одном конкретном месте, сначала ставится метка 0° , и на основе этой метки могут быть измерены другие углы путем преобразования радиуса и окружности.

В методике предусмотрено несколько процедур для балансировки в одной и двух плоскостях. Далее описаны две процедуры для балансировки в одной плоскости. Для удобства понимания каждая процедура объясняется на конкретном примере.

Трехточечная балансировка в одной плоскости

Первая процедура представляет собой трехточечную балансировку в одной плоскости. Для реализации необходимы только пробный вес и пара компасов.

Как видно из названия, на роторе отмечены три контрольные точки, T1, T2, T3, для прикрепления к ротору пробного веса в положениях 0 , 120 и 240° .



Подходящую величину пробного веса можно определить по следующей формуле.

$$MT = G * s/r$$

MT: пробный вес

G: вес вибрирующих деталей

s: амплитуда смещения вибрации

r: расстояние между пробным весом и осью вращения

Для выполнения процедуры достаточно, чтобы пробный вес был приблизительно равен такой величине. Допускается также установка пробного веса, чья величина составляет полтора или половину расчетного веса.

В качестве первого шага пробный прогон производится без пробного веса для регистрации степени вибрации VO. Предположим, что результат следующий.

$$VO = 8,0 \text{ мм/с}$$

Необходимо следить за тем, чтобы VO измерялось при частоте вращения.

Затем пробный вес MT закрепляется в точках T1, T2, T3 по очереди, после чего каждый раз выполняются пробный запуск машины и измерение степени вибрации V. Предположим, что результаты измерения следующие.

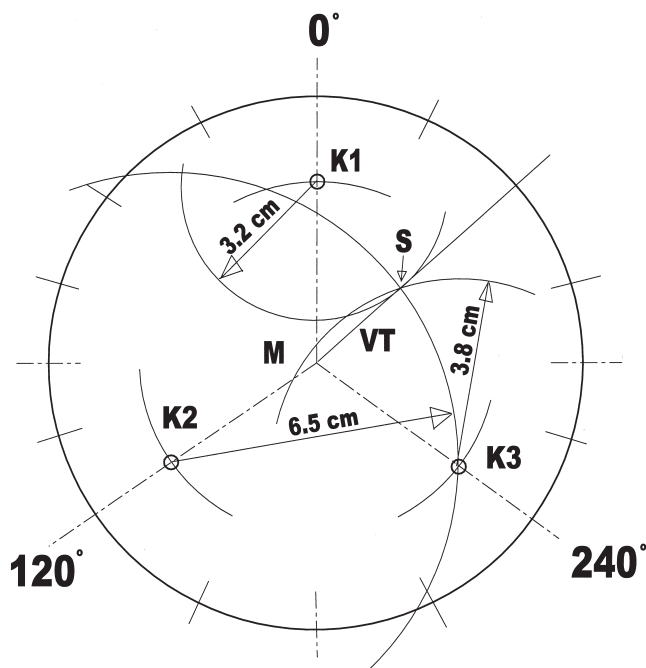
$$V1 = 6,4 \text{ мм/с}$$

$$V2 = 13,0 \text{ мм/с}$$

$$V3 = 7,6 \text{ мм/с}$$

Пробный вес в этом примере составляет $MT = 22,5 \text{ г}$.

Измерение лучше всего оценивать на специально подготовленном листе, где представлен базовый контур, градуированный в градусах, как показано на следующей странице.



Значения	Результаты	
Без груза $VO = 8,0$	$VT = 5,0$	$WA = 307$ град.
Пробный вес в положении 0 град. $V1 = 6,4$		$MA = 36$ г
Пробный вес в положении 120 град. $V1 = 6,4$		
Пробный вес в положении 240 град. $V1 = 6,4$		
Пробный вес $MT = 22,5$		

Для этой цели выбирается подходящая шкала: 1 см соответствует 2 мм/с. Здесь нарисован круг с точкой M в качестве его центра, а VO является его радиусом. В нашем примере этот масштаб будет означать, что $r = 4,0$ см. Точки K1, K2 и K3 являются точками пересечения этой окружности с тремя опорами 1, 2 и 3. Следующий шаг — необходимо нарисовать круги вокруг этих точек: с радиусом V1 (т. е. 3,2 см) вокруг K1; с радиусом V2 (т. е. 6,5 см) вокруг K2; и с радиусом V3 (т. е. 3,8 см) вокруг K3. Со всем не обязательно, чтобы все эти круги целиком помещались на бумаге. Решающей точкой является место общего пересечения всех трех кругов, точка S.

Угол WA , представленный опорами с M до S , соответствует углу, под которым балансировочный груз MA должен быть закреплен на роторе; в этом случае:

$$WA = 307^\circ.$$

Измеряется длина отрезка от M до S и обозначается VT . В этом примере:

$$VT = 5,0 \text{ мм/с.}$$

Как правило, балансировочный груз устанавливается на одном и том же расстоянии r от центра в качестве пробного веса. Балансировочный груз MA рассчитывается по следующей формуле.

$$MA = V0 \cdot MT / VT = 8 \times 22,5 / 5$$

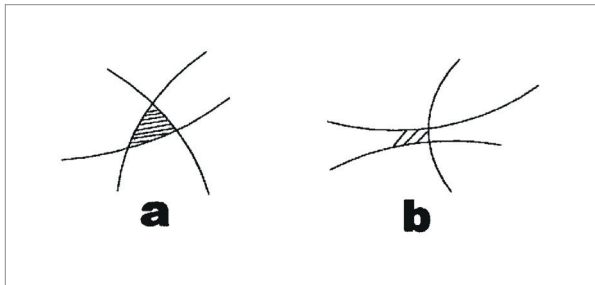
Результат, полученный для нашего примера следующий.

Балансировочный груз $MA = 36$ г, он расположен под углом 307 градусов от отметки O

Если балансировочный груз должен быть зафиксирован на меньшем или большем расстоянии R от оси, то балансировочный груз должен быть рассчитан следующим образом.

$$MA(1) = r / R \times MA$$

В большинстве случаев измерения не будут пересекаться в одной точке, как показано в нашем примере; пересечение S было несколько идеализировано. В большинстве примеров образуется небольшой треугольник (вид а), или в исключительных обстоятельствах полный треугольник может не получиться (вид б). В этих случаях среднее значение следует выбирать из заштрихованной части области пересечения.



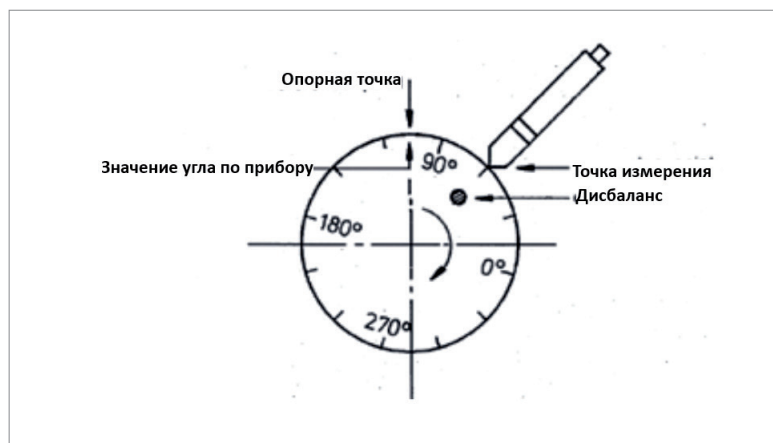
Если треугольник или заштрихованная область будут очень большими, то вибрация связана не с дисбалансом, а с другими дефектами. В этом случае необходимо провести еще один анализ вибрации, предпочтительно дополненный измерением ударного импульса.

Метод стробоскопа в одной плоскости

Вторая процедура, рассматриваемая здесь для балансировки в одной плоскости, представляет собой **метод стробоскопа в одной плоскости**. В качестве дополнительного инструмента используется стробоскоп, который можно синхронизировать с частотой вращения машины с помощью анализатора вибрации. Этот метод является более затратным по сравнению с предыдущим методом, однако он имеет то преимущество, что вместо четырех требуется только два пробных прогона и соответствующая оценка может быть выполнена как графически, так и путем расчетов.

Для балансировки ротор снова градуируется против часовой стрелки от 0° до 360° . Во время измерения эта градуировка просматривается световым лучом синхронизированного стробоскопа, так что машина кажется неподвижной.

Первый прогон производится без пробного веса. Параметры, подлежащие регистрации: степень серьезности вибрации VO и — с помощью стробоскопа — угол WO возникающей вибрации SO . Необходимо следить за тем, чтобы значение VO измерялось выборочно для частоты вращения. Для измерения углов контрольная отметка фиксируется, например, в верхней части, затем она используется для пробных прогонов и считывания угла.



Во втором пробном прогоне пробный груз МТ прикрепляется под углом 0° на расстоянии r от оси вращения. Затем регистрируется вибрация ST со степенью вибрации VT и фазовым углом WT , как и в первом пробном прогоне. Измерительная точка для датчика вибрации и контрольная отметка для измерения углов во время выполнения процедуры должны оставаться неизменными.

В качестве примера приняты следующие зафиксированные значения.

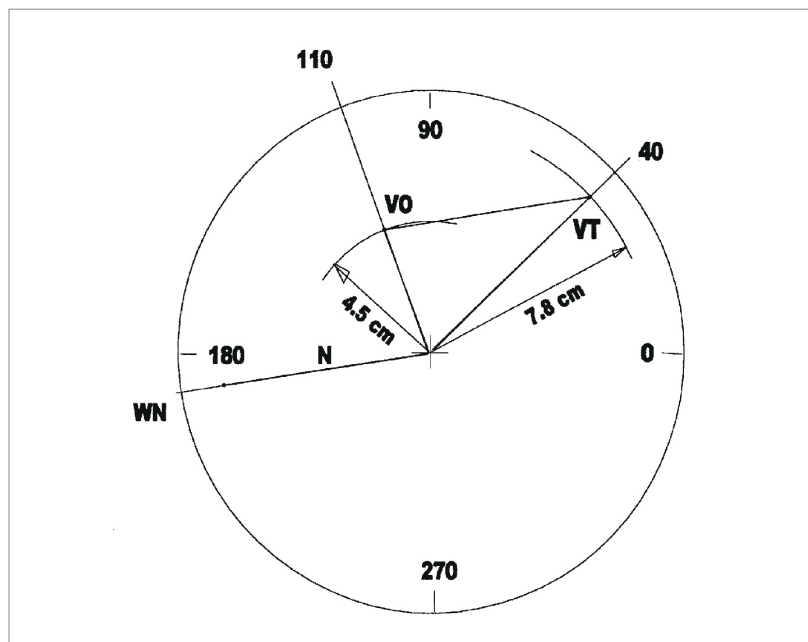
$SO: VO = 9 \text{ мм/с}; WO = 110^\circ$

$ST: VT = 15,6 \text{ мм/с}; WT = 40^\circ$

Пробный вес МТ = 20 г

Коррекция графическим методом

Первым шагом является построение SO и ST в подходящем масштабе в виде круга, градуированного в градусах, причем конечные точки — O и T . Затем стрелка от T до O смещается параллельно центру. Ее длина измеряется и обозначается N ; угол равен WN .



Величина балансировочного груза MA рассчитывается следующим образом.

$$MA = SO \cdot MT / N$$

Его угловое расположение

$$WA = WO - WN$$

Результат

$$WA = 280^\circ, MA = 12 \text{ г.}$$

Коррекция методом расчета

Для оценки путем расчета необходимо использовать комплексные числа. Показатели несбалансированности и вибрации, а также балансировочный груз могут считаться комплексными числами в полярных координатах.

Преобразование этих комплексных чисел в декартовы координаты дает выражения, показанные ниже.

Данные величины VO, WO, VT, WT, MT

$$VO = 9 \text{ мм/с}; WO = 110^\circ$$

$$VT = 15,6 \text{ мм/с}; WT = 40^\circ$$

$$MT = 20 \text{ г}$$

Этап 1

Преобразование SO и ST в декартовы координаты

$$SOX = VO \cdot \cos(WO) \quad SOX = 9 \text{ мм/с} \cdot \cos(110^\circ) = -3,08 \text{ мм/с}$$

$$SOY = VO \cdot \sin(WO) \quad SOY = 9 \text{ мм/с} \cdot \sin(110^\circ) = 8,46 \text{ мм/с}$$

$$STX = VT \cdot \cos(WT) \quad STX = 15,6 \text{ мм/с} \cdot \cos(40^\circ) = 11,95 \text{ мм/с}$$

$$STY = VT \cdot \sin(WT) \quad STY = 15,6 \text{ мм/с} \cdot \sin(40^\circ) = 10,03 \text{ мм/с}$$

Этап 2

Расчет SO – ST

$$NX = SOX - STX \quad NX = -15,03 \text{ мм/с}$$

$$NY = SOY - STY \quad NY = -1,57 \text{ мм/с}$$

$$N^2 = (NX)^2 + (NY)^2 \quad N^2 = 228,4 \text{ мм/с}$$

Этап 3

Расчет балансировочного груза

$$AX = (SOX \cdot NX + SOY \cdot NY) \cdot (MT / N^2) \quad AX = 2,89 \text{ г}$$

$$AY = (SOY \cdot NX - SOX \cdot NY) \cdot (MT / N^2) \quad AY = -11,56 \text{ г}$$

Этап 4

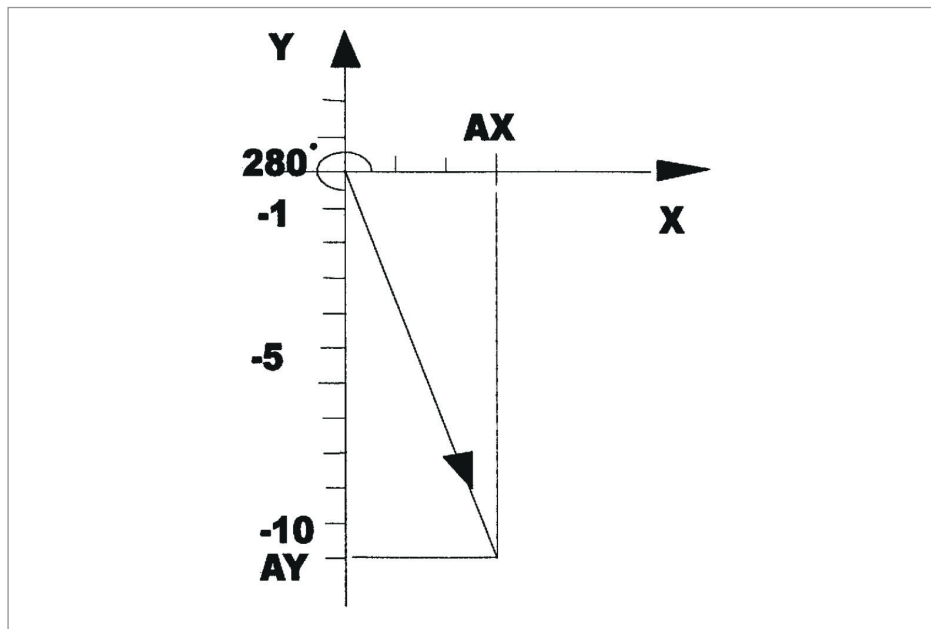
Преобразование балансирующего груза в полярные координаты

$$MA = \sqrt{(AX)^2 + (AY)^2} \quad MA = 11,9 \text{ г}$$

$$WA = \arctan[(AY/AX)] \quad WA = -76^\circ$$

В отношении WA необходимо учитывать тот факт, что калькулятор будет указывать основное значение $\tan^{-1}(AY/AX)$, и то, что при $AX = 0$ значение WA вообще не определяется. Поэтому целесообразно выполнить дополнительную графическую оценку (с удвоением в качестве дополнительной проверки), чтобы точно определить угловое положение или построить балансирующий груз в декартовых координатах. После этого точное значение WA получается путем прибавления или вычитания соответствующих кратных значений 180° .

Это один из вариантов нашего примера, где результат графической оценки и построения в декартовых координатах составляет примерно 285° . Таким образом, к ранее рассчитанному значению необходимо прибавить 360° , чтобы получить точное значение $WA = 284^\circ$.



Как и в случае трехточечного метода в одной плоскости, необходимо прикрепить рассчитанный балансировочный груз **MA** на том же расстоянии **r** от центра и использовать в качестве пробного веса. Если предпочтительным является другое расстояние, необходимо преобразовать балансировочный груз в соответствии с принципом рычага.

При использовании метода стробоскопа в одной плоскости расчет выглядит следующим образом.

Если U — дисбаланс, то первое измерение дает

$$(i) SO = a \cdot U$$

с комплексным параметром a

Во втором измерении пробный вес T прибавляется к дисбалансу U , так что результатом измерения является

$$(ii) ST = a \cdot (U + T)$$

Из формулы (i) получаем $a = SO / U$ и вставка этого значения в формулу (ii) дает

$$ST = SO \cdot (U + T) / U$$

Преобразование в U дает

$$U = (SO \cdot T) / (ST - SO)$$

Балансировочный груз A должен быть установлен на стороне, противоположной U

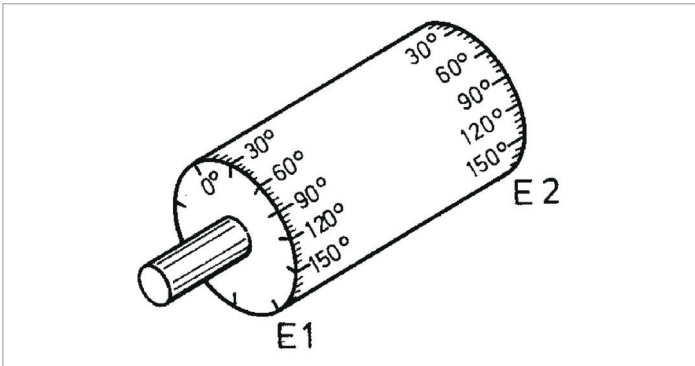
$$A = (SO \cdot T) / (ST - SO)$$

Метод стробоскопа в двух плоскостях (разработан А. Вархайтом)

Если рассматриваемый роторный блок имеет два ротора либо один ротор, ширина которого превышает его диаметр, необходимо использовать методы балансировки в двух плоскостях.

Далее мы рассмотрим один метод балансировки в двух плоскостях и покажем расчеты для получения масс балансировочных грузов и их положений.

Два конца ротора представляют собой две плоскости балансировки E1 и E2.



Этот метод аналогичен методу стробоскопа в одной плоскости, особенно в том случае, когда требуется идентичное оборудование, т. е. частотно-избирательный измеритель уровня вибрации и стробоскоп. Как и в предыдущем методе, на обе плоскости балансировки наносится градуировка в градусах, причем положения будут одинаковы на обеих плоскостях.

Необходимо выполнить в общей сложности три пробных прогона, первый без пробного веса и два других с добавленным пробным весом. Пробный вес всегда прикрепляется к точке 0°, сначала в плоскости балансировки E1, а затем в плоскости балансировки E2. При всех трех пробных прогонах выполняются измерения на любой плоскости балансировки в зависимости от степени вибрации и фазового угла — с помощью стробоскопа. Таким образом, получается двенадцать зарегистрированных значений, 13-м значением является пробный вес.

Без пробного веса

$$E1: V10 = 14,7 \text{ мм/с} \quad W10 = 56^\circ$$

$$E2: V20 = 12,0 \text{ мм/с} \quad W20 = 75^\circ$$

С пробным весом в E1

$$E1: V11 = 27,3 \text{ мм/с} \quad W11 = 33^\circ$$

$$E2: V21 = 14,1 \text{ мм/с} \quad W21 = 55^\circ$$

С пробным весом в E2

$$E1: V12 = 18,5 \text{ мм/с} \quad W12 = 45^\circ$$

$$E2: V22 = 23,9 \text{ мм/с} \quad W22 = 44^\circ$$

Пробный вес $M_T = 60 \text{ г}$

Затем на основании 13 записанных значений производится расчет для определения углов в обеих плоскостях балансировки, на которых должны быть установлены балансировочные грузы и значения этих грузов. Таким образом, получено четыре значения: MA_1 ; WA_1 и MA_2 ; WA_2 . Расчет выполняется следующим образом (см. диаграмму на следующей странице).

Шаг I

Результаты измерений вводятся в верхнюю часть листа оценки.

Шаг II

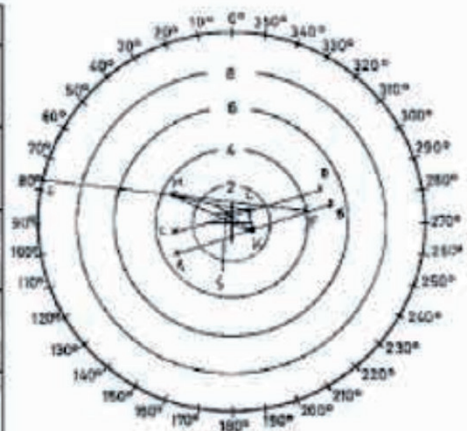
Столбцы I и II заполняются в соответствии с указаниями. Максимальный результат операции I подчеркивается; затем другие результаты 1 делятся на это значение, умножаются на 10 и вводятся в столбце VX справа. Углы, полученные в результате операции II, перемещаются непосредственно в столбец WX. Однако если угол превышает 360° , необходимо вычесть 360° для достижения результата в диапазоне от 0° до 360° .

Точки от A до F нанесены по кругу с указанием величины и угла. Радиус круга соответствует 10. Величины и углы K (центр AB), L (центр CD) и S (центр тяжести треугольника KLM, центр M EF) считаются и вводятся в соответствующие поля.

Балансировка**Метод стробоскопа в двух**Машина: **ПЛОСКОСТЯХ**Дата:

Значения:	Плоскость		Плоскость		Пробный вес:
	количество	угол	количество	угол	
1. Без пробного веса:	V10 = <u>36</u>	W10 = <u>11</u>	V20 = <u>29</u>	W20 = <u>31</u>	MT = 60 г
2. Пробный вес в E1:	V11 = <u>33.1</u>	W11 = <u>3.3</u>	V21 = <u>26.1</u>	W21 = <u>5.5</u>	WT = 0°
3. Пробный вес в E2:	V12 = <u>11.5</u>	W12 = <u>4.5</u>	V22 = <u>13.5</u>	W22 = <u>4.5</u>	

I	II		VX	WX
V12 · V20 <u>223</u>	W12 <u>45</u> +W20 <u>75</u> <u>120</u>	A	<u>3.7</u>	<u>12.0</u>
V10 · V22 <u>351</u>	180° +W10 <u>54</u> +W22 <u>44</u> <u>290</u>	B	<u>5.17</u>	<u>2.80</u>
V10 · V21 <u>201</u>	W10 <u>14</u> +W21 <u>15</u> <u>11</u>	C	<u>3.17</u>	<u>11</u>
V11 · V20 <u>327</u>	180° +W11 <u>33</u> +W20 <u>31</u> <u>292</u>	D	<u>5.01</u>	<u>2.87</u>
V11 · V22 <u>(654)</u>	W11 <u>33</u> +W22 <u>44</u> <u>77</u>	E	<u>10</u>	<u>27</u>
V12 · V21 <u>261</u>	180° +W12 <u>45</u> +W21 <u>15</u> <u>180</u>	F	<u>4.00</u>	<u>2.80</u>



VK = <u>1.33</u>	VL = <u>1.11</u>	VS = <u>0.67</u>
WK = <u>2.50</u>	WL = <u>1.80</u>	WS = <u>2.0</u>

III	$\frac{1}{3} \cdot \frac{MT}{VS} = \underline{29.25}$ (Z1)	$360^\circ - WS = \underline{348^\circ}$ (Z2)
-----	--	---

Балансировка в E1		Балансировка в E2	
MA1 = Z1 · VK	WA1 = Z2 · WK	MA2 = Z1 · VL	WA2 = Z2 · WL
MA1 = <u>39.7</u>	WA1 = <u>220°</u>	MA2 = <u>93.13</u>	WA2 = <u>230°</u>

Подпись:

Шаг III

Здесь определяются две вспомогательные величины: Z_1 и Z_2 , которые в конечном итоге используются для расчета размеров и угловых положений балансировочных грузов. Принципы метода стробоскопа в двух плоскостях заключаются в следующем. Как и в случае метода стробоскопа в одной плоскости, дисбалансы в плоскостях балансировки E_1 (U_1) и E_2 (U_2), а также пробный дисбаланс T определяются в качестве комплексных чисел.

Уровни степени вибрации без пробного веса описаны следующим образом.

$$S_{10} = a \cdot U_1 + b \cdot U_2 \quad S_{10} = (V_{10}; W_{10})$$

$$S_{20} = c \cdot U_1 + d \cdot U_2 \quad S_{20} = (V_{20}; W_{20})$$

Если a , b , c и d являются комплексными параметрами, то b и c представляют эффекты дисбалансов на другой плоскости балансировки. Поскольку уравнения содержат шесть неизвестных величин (a , b , c , d , U_1 , U_2), необходимо использовать еще четыре уравнения. Их можно получить из двух пробных прогонов с пробным весом.

$$S_{11} = a \cdot (U_1 + T) + b \cdot U_2 \quad S_{11} = (V_{11}; W_{11})$$

$$S_{21} = c \cdot (U_1 + T) + d \cdot U_2 \quad S_{21} = (V_{21}; W_{21})$$

$$S_{12} = a \cdot U_1 + b \cdot (U_2 + T) \quad S_{12} = (V_{G12}; W_{12})$$

$$S_{22} = a \cdot U_1 + b \cdot (U_2 + T) \quad S_{22} = (V_{22}; W_{22})$$

Эти уравнения дают следующие решения.

$$U_1 = \{(S_{10} \times S_{22}) - (S_{20} \times S_{12})\} / [S_{20} \times (S_{12} - S_{11}) + S_{21} \times (S_{10} - S_{12}) + S_{22} \times (S_{11} - S_{10})] \times T$$

$$U_2 = \{(S_{11} \times S_{22}) - (S_{10} \times S_{21})\} / [S_{20} \times (S_{12} - S_{11}) + S_{21} \times (S_{10} - S_{12}) + S_{22} \times (S_{11} - S_{10})] \times T$$

Определение балансировочных весов $M_1 = -U_1$ и $M_2 = -U_2$

Из предыдущих страниц очевидно, что вычисление значений коррекции дисбаланса даже для простых роторов в одной или двух плоскостях предполагает выполнение ряда сложных графических и/или математических расчетов. Рассматриваемые методы балансировки основаны на предположении существования идеальных линейных условий, которые редко встречаются в действительности. Поэтому для коррекции и

достижения требуемого качества баланса может потребоваться выполнение второй и в крайнем случае третьей процедуры балансировки.

Однако существует более простой метод динамического балансирования на месте, который существенно сокращает время, необходимое для достижения приемлемого качества баланса, и соответственно, исключает сложные расчеты из предыдущих методов.

Специальные системы балансировки, такие как VIBXPERT® II Balancer, выполняют балансировку в одной или двух плоскостях. Они графически описывают корректировки балансировочными грузами и их положения или позволяют оператору выбирать подходящие места установки, например на лопастях вентилятора, и автоматически компенсируют требования по весу для установки в это положение. Сэкономленное время и повышенная точность таких систем делают первоначальные инвестиции очень выгодными.

Расчет пробного веса

Наиболее подходящими пробными весами являются небольшие винтовые струбины, которые легко установить и снять в любом месте. Кроме того, могут использоваться винты или болты, при условии что соответствующие точки снабжены резьбовыми отверстиями. В качестве пробного веса можно использовать точно взвешенное количество специальной шпатлевки.

Само собой разумеется, что пробные веса необходимо взвешивать и осторожно крепить к ротору. Если балансировку приходится проводить довольно часто, можно подготовить набор пробных весов и сохранить его для постоянной готовности.

Инструменты, такие как VIBXPERT® II Balancer, описанные на следующих страницах, позволяют рассчитать пробный вес, который будет использоваться в дальнейшем, и определить место его установки. Однако если необходимо рассчитать дисбаланс или решить графически, следует точно рассчитать величину пробного веса, которая будет использоваться следующим образом.

Подходящий размер пробного веса можно определить с помощью приведенной ниже формулы, где MT — пробный вес, G — вес ротора, s — амплитуда смещения вибрации, r — расстояние пробного веса от центра.

$$MT = G \cdot s/r$$

Если болт должен быть установлен в качестве балансировочного груза, необходимо вычесть соответствующее резьбовое отверстие из веса болта.

Безопасность при выполнении балансировки

При выполнении балансировки вращающихся машин на месте важно, чтобы операторы были осведомлены о требованиях безопасности на рабочем месте и местных требованиях по охране труда и технике безопасности для работы на машинах. Кроме того, при установке балансировочных весов на машины они должны помнить о последствиях и требованиях безопасности. Приведенные ниже рекомендации должны выполняться в качестве минимальных мер предосторожности.

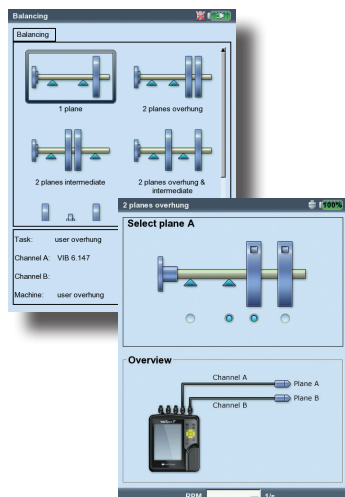
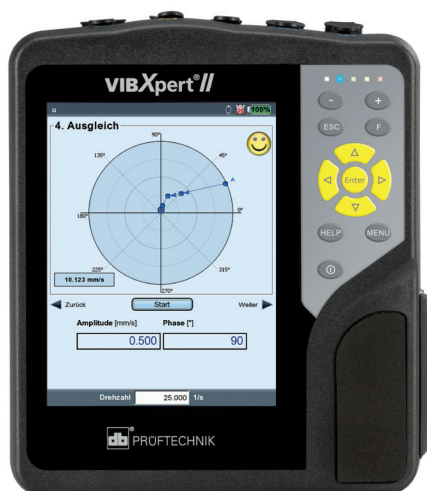
- ▶ При выполнении работ изолируйте машины, чтобы избежать случайного включения.
- ▶ При сборке измерительных компонентов убедитесь в том, что рядом с вращающимися деталями машины отсутствуют любые приспособления, кабели или другие объекты.
- ▶ При установке балансировочных весов обязательно следуйте указаниям производителя.
- ▶ Всегда работайте в пределах максимально допустимых оборотов ротора.
- ▶ Обязательно уделяйте особое внимание расчету пробной массы, которая будет использоваться для начального балансировочного прогона. Применение пробных масс с повышенной массой может иметь серьезные последствия для машин и оператора.
- ▶ Во время пробных и балансировочных прогонов убедитесь в отсутствии людей рядом с машиной.
- ▶ Перед включением машины закройте все защитные ограждения и дверцы ротора.
- ▶ Не превышайте допустимое количество пусков машины в течение заданного времени.
- ▶ Перед началом балансировки определите причину дисбаланса и по возможности уберите любые материалы, которые могут быть приклеены к ротору. Завадите любые трещины в лопастях крыльчатки, если это невозможно, замените крыльчатку.

Устройства балансировки компании PRUFTECHNIK

Принцип работы VIBXPERT® II Balancer аналогичен принципу определения баланса путем графических или расчетных методов. Для реализации каждого метода необходимо выполнить следующее.

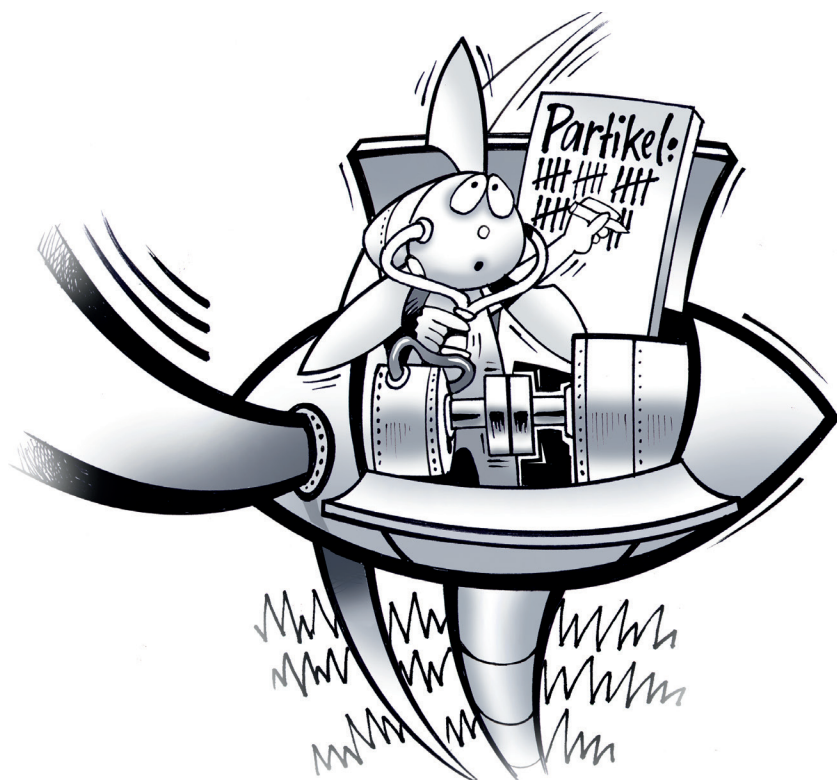
- ▶ Предварительное измерение машины для установления текущего состояния дисбаланса.
- ▶ Одно или два пробных измерения с пробными весами, в зависимости от количества плоскостей балансировки; для одной плоскости требуется один пробный прогон.
- ▶ Пробный прогон выполняется для устранения дисбаланса ротора; в некоторых случаях может потребоваться два прогона для достижения конечного состояния баланса.

Основное различие между балансировщиками VIBXPERT® II и ручными методами балансировки заключается в том, что прибор выполняет все необходимые вычисления и отображает корректирующие действия. Изначально можно выбрать различные конфигурации типа машины, чтобы установить требования по одной или двум плоскостям.



Раздел 4

Анализ продуктов износа



ОБЗОР

Анализ продуктов износа (WDA), а также ранее обсуждавшиеся методы техобслуживания, которые предназначены для увеличения срока службы машины, представляют собой всего лишь одну часть комплексного режима обслуживания. Сами по себе они не станут всеобъемлющим решением для улучшения эксплуатационных характеристик установки. Однако в некоторых случаях WDA обеспечивает очень хорошую систему раннего предупреждения начального отказа машины.

Как следует из названия, концепция WDA заключается в том, что она используется для измерения продуктов износа в системах смазки машин. Как правило, отсутствие таких продуктов является хорошим показателем того, что износ системы незначителен, а разрушения полностью отсутствуют. И наоборот, большое количество продуктов износа является надежным признаком того, что в машине происходит что-то необычное, чего не должно быть. Тип и размер таких продуктов дополнительно укажут источник и степень отказа компонента.

Нет сомнений в том, что все компоненты со временем изнашиваются, и такая ситуация, когда в образце смазки не будут обнаружены продукты износа, является маловероятной. В данном случае важными являются размер и увеличение количества инородных частиц. Повсеместно применяется метод тренда данных WDA, поэтому необходимо периодически измерять текущее состояние компонента машины, такого как подшипник. Можно получить надежный признак состояния компонента при проведении анализа проб методом «моментальных снимков». Значительное количество частиц будет указывать на прогрессирующий и часто неустраняемый износ компонента, который требует практически немедленного выполнения работ по предотвращению аварийных ситуаций, чтобы не допустить отказа машины. Наличие небольшого количества частиц или их полное отсутствие указывает на то, что компонент находится в нормальном состоянии.

На самом деле все не так просто. Необходимо проанализировать частицы, обнаруженные в образцах смазочных материалов, таким образом, чтобы размер и содержание частиц можно было использовать в качестве руководства для поиска источника продуктов износа. Изначально метод WDA широко использовался в горнодобывающей промышленности, где частицы угольной пыли, находящиеся в воздухе, часто попадали в машины, загрязняя смазочные среды для подшипников, зубчатых передач и других «скользящих» компонентов. Метод WDA был очень хорошим показателем раннего обнаружения уровня загрязнения и степени, до которой эти абразивные частицы, находящиеся в воздухе, повреждают скользящие компоненты машин. Во многих случаях WDA является первым индикатором возможного отказа машинного узла.

Однако следует проявлять осторожность, поскольку то, что вы видите, не всегда соответствует тому, что вы имеете. Точность показаний и анализа полностью зависит от качества взятой пробы. Пробы, взятые на большом расстоянии от целевого компонента, могут быть загрязнены компонентами, расположенными «ниже по потоку», пробы могут быть отобраны в «нечистых» контейнерах или с использованием уже загрязненных систем отбора проб. Как следствие, данные могут быть искажены и бессмысленны для проведения анализа. Необходимо со всей тщательностью выбирать места отбора проб, методы и инструменты отбора проб.

Обзор методов WDA

Как правило, существует два типа WDA-методов, которые используются в промышленных областях применения: автономный анализ и оперативный (или линейный) анализ. Эти методы представляют совершенно разные подходы к применению WDA. Как следует из названия, оперативный (линейный) анализ включен в системный процесс. Это позволяет получить более непосредственные результаты, чем более широко применяемый автономный метод. Однако оперативный анализ в значительной степени зависит от количества частиц разного размера. Как правило, при оперативном анализе подробный анализ содержания продуктов износа невозможен.

Оперативный анализ

В рамках методов оперативного анализа существует ряд различных вариантов системы, предназначенных для улавливания или измерения определенных частиц продуктов износа.

- ▶ **Блокировка фильтра** — поток проходит через фильтр с известным размером отверстий, изменения в характеристиках потока указывают на увеличение размера частиц, вызывающее блокировку линейного фильтра.
- ▶ **Магнитное притяжение** — в системе используется магнит для захвата частиц мусора в ловушку, далее выполняется измерение в режиме реального времени для оценки объема частиц.
- ▶ **Оптический метод** — внутри источника света, сфокусированного по линии потока, расположены оптические детекторы. Они оценивают размер частиц путем дифракции источника света или с помощью фотодиода, чтобы определить уменьшение измеряемой интенсивности света.
- ▶ **Износ пленки** — жидкость попадает на поверхность, покрытую тонким проводящим слоем. Поскольку частицы удаляют часть пленки на поверхности, сопротивление всей пленки увеличивается. Такой износ указывает на повышение уровня продуктов износа и последующих проблем с износом.

- ▶ **Ультразвук** — ультразвуковой луч фокусируется в жидкости. Выполняется измерение сигнала эха по мере того, как он попадает на частицы мусора. Если количество частиц увеличивается, эхо-сигнал изменяется (увеличивается).

В каждой подгруппе существует несколько различных методов, каждая используемая система обладает своими преимуществами. В зависимости от конкретных требований требуемого анализа частиц инженеру необходимо определить тип системы для оперативного анализа. Например, если необходимо анализировать только железистые частицы, то следует использовать магнитную оперативную систему. Однако если необходимо измерить содержание продуктов износа подшипника из цветных металлов, например из белого металла или фосфорной бронзы, следует использовать устройство для определения этих материалов. Аналогичным образом, если необходимо измерить содержание всех возможных частиц, для получения требуемых данных о частицах может быть использована простая система блокировки фильтра. Тем не менее все оперативные системы имеют общую проблему (за исключением системы блоков фильтров) — их выбор зависит от типа анализа. Выбор таких систем определяется типом анализа частиц, а не возможностью анализа широкого спектра, который возможен при автономной системе WDA.

Однако оперативный анализ имеет одно явное преимущество перед автономным анализом, поскольку он позволяет выполнять WDA в машинах и системах, доступ людей к которым чреват приложением значительных усилий или наличием потенциальной опасности. Такие области применения, как редукторы ветрогенераторов и судовых двигателей, представляют собой типичные системы машин, измерения продуктов износа на которых затруднены без проведения оперативного анализа.

Автономный анализ

Этот метод более активно используется в общих промышленных областях применения, он предлагает аналитику значительно больший объем данных для оценки широкого спектра частиц. Однако, как отмечалось ранее, необходимо тщательно следить за процессом отбора проб частиц и их хранения для последующего анализа.

Автономный анализ может быть более или менее точно разделен на три типа методов анализа: анализ «пятна», феррография и концентрация частиц. Каждый из них включает ряд методов анализа образцов и возможности для более или менее детального анализа.

Анализ «пятна»

Анализ «пятна», вероятно, является наиболее распространенным методом автономного анализа частиц. Пробу смазки пропускают через фильтрующую мембрану; частицы осаждаются на фильтре для последующего исследования. Преимущество этого метода заключается в том, что на фильтре осаждаются любые типы частиц, что при необходимости позволяет проводить всесторонний анализ продуктов износа. Это может быть достигнуто несколькими способами: от очень грубого до очень подробного.

- ▶ **Грубый анализ/анализ цвета** — здесь проводится сравнение между фильтром с осадком частиц и новым чистым фильтром. Обычно этот анализ используется для определения степени загрязнения в трех или четырех стандартных состояниях: хорошем, приемлемом и состоянии предупреждения.
- ▶ **Грубый/промежуточный анализ** — стандартные сравнения — в этом методе применяется стандартный набор фильтров, выполненный в соответствии с концентрацией или чистотой мусора по стандарту ISO 4406. Кроме того, здесь также проводится сравнение между фильтром с частицами и фильтрами ISO, чтобы определить хорошие, приемлемые уровни или уровень предупреждения по концентрации частиц. Такой тип системы часто встречается во многих доступных наборах портативных WDA-анализаторов.
- ▶ **Промежуточный анализ** — подсчет частиц — обычно выполняется на мембране фильтра с сеткой, вытравленной на поверхности. Здесь производится подсчет общего количества частиц мусора в любой одной области сетки, затем общее количество частиц определяется путем умножения на количество областей сетки. Данная система классифицируется здесь в качестве промежуточной просто потому, что размер и распределение частиц можно дополнительно проверить с помощью микроскопа.
- ▶ **Промежуточный/расширенный анализ** — использование визуального контроля — здесь выполняется подробное наблюдение частиц мусора. Такое наблюдение позволяет проанализировать форму, размер, тип и концентрацию загрязнения частицами. Микроскопическое исследование, различные типы освещения и опыт оператора позволят точно определить уровень и общий состав загрязняющих примесей.
- ▶ **Расширенный анализ** — использование сканирующего электронного микроскопа — этот метод обеспечивает доступ к очень подробной оценке, анализу и отчетности по концентрации частиц в пробе, включая конкретные элементы продуктов износа в каждой пробе для анализа.

Концентрация частиц

Этот метод может быть реализован с помощью визуальных или магнитных методов анализа частиц. Обычно пробу переносят в оптически прозрачный стеклянный сосуд. Затем содержимое образца помещают в миксер для равномерного распределения частиц по всей пробе. После этого проводится оценка частиц с применением оптического устройства или магнитной индукции, чтобы определить размеры, тип и распределение частиц. Очевидно, что при использовании магнитной индукции в пробе можно проверить только железистые частицы.

Как правило, такой метод анализа используется в сочетании с более детальным лабораторным анализом содержания частиц.

Феррография

Как следует из названия, этот метод анализа применим для железистых и других магнитных частиц. Он чрезвычайно полезен для определения содержания частиц железа в пробе, но практически бесполезен для оценки других немагнитных частиц, таких как люминофорная бронза или белый металл. Препарат, полученный с использованием этого метода, позволит идентифицировать железистые продукты износа. При нагревании препарата частицы железа можно сравнить со стандартной диаграммой цвета частиц износа, чтобы установить фактическое содержание частиц продуктов износа в пробе.

Оценка результатов анализа WDA

Как и для всех методов технического обслуживания на основе контроля состояния оборудования, необходим определенный уровень опыта специалистов, чтобы точно установить, когда потребуется выполнение работ по предотвращению аварийных ситуаций в отношении конкретного блока оборудования. Если, например, при использовании грубого или промежуточного анализа пробы WDA цвет препарата значительно отличается от контрольной пробы или препарата, то очевидным решением является как минимум дальнейший и более подробный анализ. Тогда это становится двухступенчатой стратегией анализа WDA. Необходимо взять вторую пробу WDA и отправить в лабораторию для детального анализа. В зависимости от содержимого отчета можно предпринять какие-либо действия для предотвращения повреждения компонентов машины.

Грубый или промежуточный анализ становится важным звеном в стратегии обслуживания WDA. Несмотря на то что менеджер по техническому обслуживанию ранее мог отклонить этот метод как недостаточно подходящий для установки, он обеспечивает легкодоступный и простой источник оценки рабочего состояния установки. Его дополнительным преимуществом является то, что он требует очень небольшого обучения для оперативного сравнения проб с заранее подготовленными контрольными препаратами. Именно поэтому многие портативные аналитические лаборатории по анализу масла представляют собой хороший продукт для внедрения в WDA.

В расширенном варианте WDA выполняется подробный анализ пробы продуктов износа, традиционно отобранную пробу отправляют в специальную лабораторию. Анализ будет всесторонним, он должен сопровождаться подробным отчетом по пробе, включая общую спектрограмму пробы вместе с описанием и анализом каждого элемента, найденного в пробе. Такой отчет должен включать список пропорций для каждого элемента, обнаруженного в пробе.

Если лабораторный анализ является обычной процедурой, необходимо подготовить график трендов проб с течением времени. В зависимости от лаборатории и цены, которую вы готовы заплатить за анализ, можно получить указание на источник какого-либо значительного увеличения определенного постороннего элемента и, следовательно, на любой компонент, который может определять признаки усиленного износа. Например, без графика тренда лабораторный анализ пробы является всего лишь мгновенным снимком текущего состояния смазки машины. Он не дает никаких указаний на какие-либо изменения в рабочем состоянии и, следовательно, имеет ограниченное применение или может идентифицировать машины только в расширенном состоянии отказа компонента.

Разумеется, очень важно, чтобы каждая проба, отправленная для анализа, была точно идентифицирована в отношении места ее отбора, машины, даты и времени взятия пробы. Как отмечалось ранее, важно также, чтобы проба каждый раз отбиралась из одного и того же места, чтобы анализ имел серьезную значимость.

Процедура взятия проб и место отбора проб

Необходимо еще раз подчеркнуть, что место и повторяемость имеют большое значение при использовании отбора проб в рамках WDA. Наиболее оптимальный вариант заключается в том, чтобы точка отбора проб была предусмотрена в качестве неотъемлемой части системы машины и была расположена в находящейся под давлением части системы. Такая организация процесса обеспечит гарантированный повторяемый процесс отбора проб и, следовательно, надежные результаты WDA.

Если такая организация невозможна, то проба должна быть отобрана в таком месте, которое является постоянно доступным, например в масляном баке или поддоне. Следует признать, что на результаты могут влиять другие загрязнения, но, как и при любом мониторинге состояния, что-то всегда лучше, чем ничего.

Там, где это возможно, выделение точки отбора проб представляет идеальный вариант, и здесь есть много опций. Точка отбора проб, предоставленная каждым производителем, обеспечит чистое и легкодоступное место для пробоотборника без каких-либо утечек. Кроме того, все производители будут предоставлять пробоотборные устройства, соответствующие их системам.

Если оператор должен полагаться на пробы, взятые из нефиксированной точки, тогда необходимо использовать вытяжной шприц, прикрепленный к бутылке для проб. Это позволит оператору отобрать пробу в бутылку. Перед тем как отобрать пробу таким образом, необходимо убедиться в том, что пробоотборная трубка тщательно промыта чистой (такой же) смазочной жидкостью, которая должна быть взята в качестве пробы. Необходимо следить за тем, чтобы пробоотборная трубка была подвешена в жидкости и не попадала в осажденный слой мусора в нижней части резервуара.

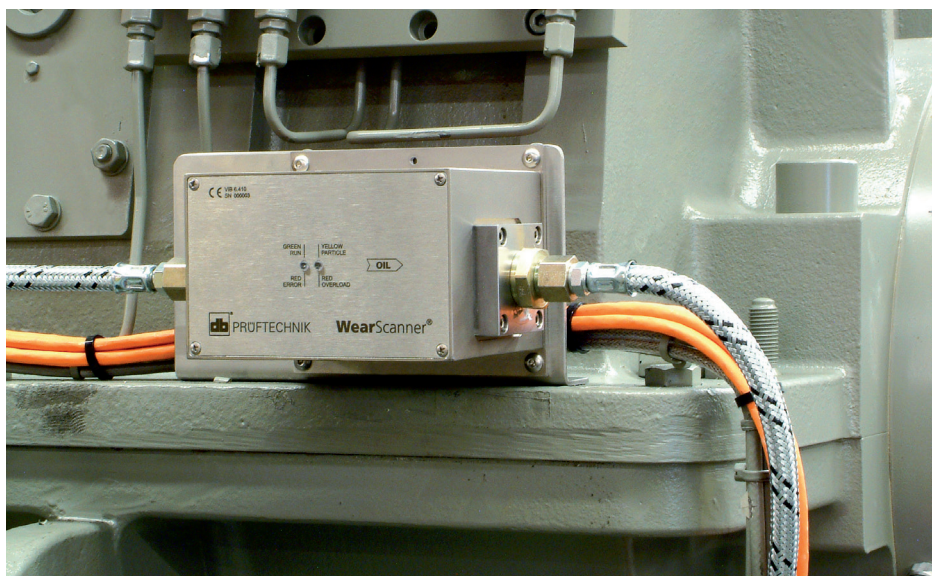
Простое опускание бутылки с образцом в резервуар, чтобы отобрать пробу жидкости, не является подходящим методом. Это приводит к потенциальному попаданию ряда дополнительных загрязнителей, которые могут повредить отобранную пробу жидкости.

Вышеприведенную информацию следует рассматривать в качестве руководства только для обеспечения возможности внедрения системы WDA на вашем заводе. Библиография в конце этой книги содержит дополнительные важные сведения, которые помогут реализовать успешный режим WDA.

Компания PRUFTECHNIK представила оперативную систему WDA, предназначенную для раннего предупреждения о повреждениях подшипников и редукторов в критическом оборудовании, таком как редукторы ветрогенераторов и судовых двигателей. Далее описаны сама система и основной принцип ее действия.

Система WDA компании PRUFTECHNIK

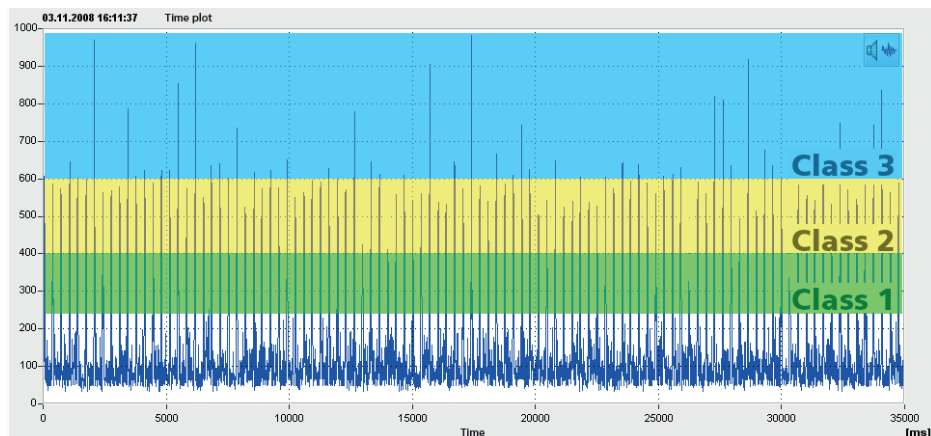
Система WEARSCANNER® контролирует распределение частиц в смазочном масле. Она обнаруживает частицы металла в циркулирующем смазочном масле, регистрирует их в режиме реального времени и классифицирует по размеру в соответствии с ISO 16232.



Если количество частиц в определенном классе размеров превышает определенное предельное значение, то система подает аварийный сигнал через сигнал переключения. Внутренний кольцевой буфер может вмещать данные за один год, при сохранении значений с двухминутными интервалами. Их можно прочитать в любое время, чтобы провести анализ трендов или проконтролировать превышение пороговых значений. Если система встроена в сеть передачи данных, то она передает данные измерений в систему управления по шине Modbus. Если система WEARSCANNER® используется в сочетании с системой оперативного мониторинга состояния VIBROWEB® XP, то данные передаются в Центр мониторинга по электронной почте.

Количество частиц определяется температурой масла, расходом, содержанием воздуха и воды и потемнением (особенно при использовании оптических методов). Запатентованный метод WEARSCANNER®, основанный на принципе вихревого тока, не зависит от этих ограничивающих параметров.

Принцип действия WEARSCANNER®



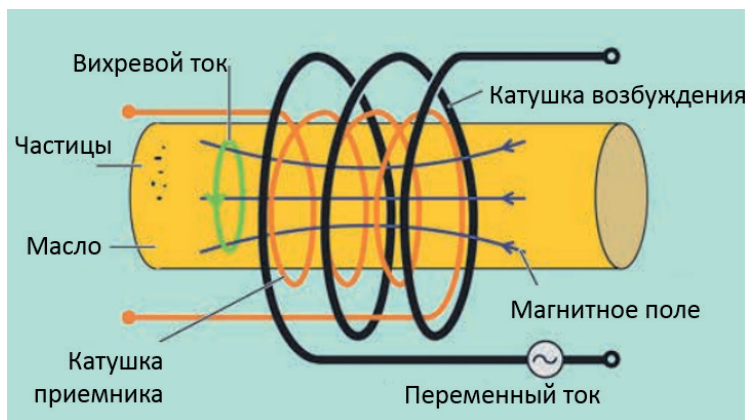
- ▶ Каждый пик представляет частицу, которая проходит через трубку датчика.
- ▶ Амплитуда указывает на размер частицы.
- ▶ Подсчет пиков осуществляется в заданные интервалы времени, и количество пиков в течение временного интервала передается через ModBus TCP.
- ▶ Для каждой конкретной ситуации настроены определенные категории размеров — в данном случае три класса.
- ▶ Система позволяет выбрать временное разрешение и скорость сканирования.
- ▶ Чувствительность может быть настроена путем регулировки коэффициента усиления, мощности и фильтра на машине.

Принцип измерения вихревых токов

Катушка возбуждения, которая генерирует переменное магнитное поле, индуцирует в масле вихревые токи. **Катушка приемника** обнаруживает плотность полученного вихревого тока.

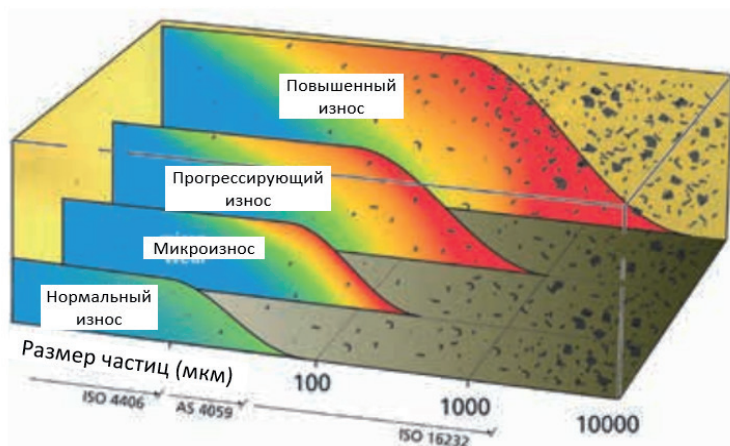
Электропроводящие, то есть ферритные и неферритные, загрязняющие вещества в масле изменяют ток между возбуждающей и приемной катушками. Для обнаружения

даже мельчайших частиц при высоких скоростях потока, система WEARSCANNER® использует метод быстрореагирующих дифференциальных катушек с двумя обмотками приемника, соединенными в противофазе.



Распределение частиц в масле по размеру

Как правило, чем больше размер частиц, тем больше повреждение.



Раздел 5

Ресурсы



О КОМПАНИИ PRUFTECHNIK

Компания PRUFTECHNIK — это международная компания, которая занимается проектированием, изготовлением и продажей измерительных и диагностических систем, используемых для лазерной центровки, мониторинга состояния и неразрушающего контроля.

Первоначально основанная в 1972 году в Мюнхене Дитером Бушем, компания сначала выступала в качестве маркетинговой компании для ряда металлодетекторов и оборудования для испытаний подшипников. По мере становления компании был разработан новый ассортимент собственных систем тестирования на основе вихревых токов, а в последующие несколько лет — первая в мире система лазерной центровки валов OPTALIGN®. За этим последовали системы анализа вибрации и динамической балансировки, разработанные с использованием уникального подхода компании PRUFTECHNIK к простоте эксплуатации и применения.

Главный офис PRUFTECHNIK по-прежнему находится в Германии, однако компания создала дочерние компании в Великобритании, Бельгии, Нидерландах, Франции, Сингапуре, Италии, Испании, Канаде, США, Турции, Японии, России, Китае, Польше, Индии, Бразилии и Дубае. Помимо этого, PRUFTECHNIK имеет сеть из более чем 70 торговых партнеров по всему миру. Близость к клиентам для компании PRUFTECHNIK является неотъемлемым элементом ее прошлого и будущего успеха. Многие современные продукты являются результатом давних рабочих отношений со своими клиентами. Быть ближе к рынку — это не просто лозунг.

Помимо непревзойденного ассортимента продукции, PRUFTECHNIK предлагает международную сеть обучения, обслуживания и поддержки, которая обеспечивает обучение по продуктам, консультационные и специализированные услуги в таких областях, как центровка, установка, ввод в эксплуатацию и планирование систем мониторинга состояния.

PRUFTECHNIK обладает более чем 200 мировыми патентами и 100 зарегистрированными товарными знаками для своей инновационной продукции.



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Центровка валов

- ▶ Shaft Alignment Handbook, 2nd edition, John Piotrowski, ISBN 0-8247-9666-7
- ▶ Maintenance Fundamentals, Keith Mobley, ISBN 0-7506-7151-3
- ▶ Introduction to Machinery Analysis, John Mitchell 1993, ISBN 0-87814-401-3
- ▶ Infrared Thermography and Laser Alignment Technologies, 1994, Infraspection Institute, Frank Pray and Bruce Bortnem
- ▶ Drives and Seals, M J Neal, ISBN 0 7506 0981 8

Анализ вибрации

- ▶ The Vibration Monitoring Handbook, Coxmoor publishing, ISBN 1 90189 200 X
- ▶ International Conference on Condition Monitoring, Coxmoor publishing, ISBN 1 90189 214 X
- ▶ Management Guide to Condition Monitoring in Manufacture, Institute of Production engineers, ISBN 0 85510 037 0
- ▶ Vibration Spectrum Analysis, Steve Goodman, 2nd Edition, ISBN 08311 30881

Балансировка

- ▶ Dynamic Balancing of Rotating Machinery, JB Wilcox, ISBN 0273429590
- ▶ Machinery Vibration Balancing, Victor Wowk, ISBN 00707 1938 1
- ▶ Balancing Accuracy of Rigid Rotors, No 8, Dott. Ing. Luigi Buzzi, booklet, III edition 1989, translated by P F Kercher

Анализ продуктов износа

- ▶ Wear Debris Analysis, Brian Roylance, Trevor Hunt, ISBN 1 90189 202 6
- ▶ A Handbook of Oil Analysis, Augustus H Gill

Стандарты ISO

- ▶ Механическая вибрация — оценка вибрации машины по результатам измерений невращающихся деталей, ISO 10816 — 3
- ▶ Оборудование для балансировки по месту эксплуатации — описание и оценка, ISO 2371
- ▶ Качество балансировки вращающихся твердых тел, ISO 1940 — 1973
- ▶ Чистота компонентов в контурах жидкостей, ISO 16232-1:2007

Включая

- ▶ Метод извлечения загрязняющих веществ ультразвуковыми методами
- ▶ Определение массы частицы гравиметрическим анализом
- ▶ Метод извлечения загрязняющих веществ ультразвуковыми методами
- ▶ Измерение и подсчет частиц методом микроскопического анализа
- ▶ Измерение и подсчет частиц с помощью автоматического счетчика частиц методом затухания света



ООО «Прюфтехник»
 198216 Санкт-Петербург
 пр. Народного Ополчения
 д. 10, лит. А, пом. 232-Н
 Тел: +7 (812) 313-00-85
 russia@pruftechnik.com
 www.pruftechnik.ru

