

Conceptos básicos y sencillos del diagnóstico de vibraciones. Guía para principiantes.



Radek Sglunda
Adéla Štefková
Radim Langer



Lista de abreviaciones

- AVG – Valor medio (del inglés *Average value*)
- RMS – Valor RMS (del inglés *Root Mean Square*)
- RPM – Revoluciones por minuto
- * símbolo de multiplicación
- μm – micrómetro
- disp. = desplazamiento
- vel. = velocidad
- acc. = aceleración

Contenido

No hay nada que temer	3
Un poco de historia sobre la gestión del mantenimiento	3
Medición.....	4
Evaluación de los valores de medición.....	4
El uso de estándares	4
¿Y si no hay estándares?	5
¿Cuál es la tasa de éxito del diagnóstico?.....	5
Forma de Onda.....	6
Amplitud de la vibración	7
Digitalización de la señal.....	7
Frecuencia de muestreo	8
AVG – Valor medio	8
Podemos imaginar el valor medio de otra forma.	9
Influencia de la forma de onda en el valor medio.....	10
Valor RMS.....	11
Un poco de matemáticas	12
Independencia de la longitud de la señal	12
¿Qué es la frecuencia?.....	13
Frecuencia de la velocidad de la máquina	14
Sensor de vibración	14
Analogía con el voltaje alterno en la red eléctrica.....	15
¿Frecuencias de vibración y qué hacer con ellas?.....	15
Unidades SI	17
Medición de desplazamiento	17
Medición de velocidad.....	18
Medición de aceleración	19
La máquina también es una masa sobre resortes	22
Período y fase	22
Detección y análisis	24
Medición global.....	24
Tipos de sensores.....	24

Montaje del sensor en la máquina	25
¿Dónde medir la vibración en la máquina?.....	26
Medición de la velocidad.....	26
¿Qué valores medir al principio?.....	27
¿Cuáles son los fallos básicos de la máquina?.....	27
¿Cómo evaluar los valores medidos?.....	28
Diagnóstico potente incluso con un medidor de vibraciones simple	29
¿Qué es la resonancia?.....	30
Desequilibrio eléctrico.....	32
Realización de medidas en la práctica.....	34
Informes de medida.....	35
Organización y evaluación de las medidas.....	35
Calibración.....	36
Forma de onda y espectro	37
Diagnóstico avanzado de rodamientos mediante demodulación (análisis de envolvente).	40
Escuchar las vibraciones.....	44
Ultrasonido	44
Recálculos de los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento	44
¿Por qué medimos las bajas frecuencias en desplazamiento y las altas frecuencias en aceleración?.....	45
Medidas en línea.....	46
Equilibrado.....	47
Configuración de los parámetros básicos de medición	48
Ajustes del sensor	48
Ajustes de la medición global.....	48
Ajustes de la medición de la forma de onda	49
Ajustes de la medición del espectro	49
Ajustes de la medición del espectro de demodulación	50
¿Qué decir para concluir?.....	51

No hay nada que temer

Si se enfrenta a la tarea de implementar y realizar diagnósticos de vibraciones en su empresa, no entre en pánico. Este campo ofrece procedimientos y métodos tanto simples como complejos. Comenzará con los más simples y, gradualmente, llegará a los más complejos. Al principio, realizará medidas muy similares a las que se hacen con un voltímetro. Sin embargo, no medirá voltaje, corriente o resistencia, sino valores de vibración.

La tarea fundamental del diagnóstico es prevenir fallos inesperados, ya que la eliminación de sus consecuencias conlleva altos costos. Si un rodamiento se gripa inesperadamente, no solo se dañará este, sino también varios componentes del equipo que lo rodean. Por eso es caro.

El diagnóstico le advertirá con antelación sobre el deterioro del estado del rodamiento, de modo que podrá planificar el cambio durante una parada de mantenimiento programada y los costos serán mucho menores. Por lo tanto, la tarea del diagnóstico es reducir los costos de mantenimiento.

Un poco de historia sobre la gestión del mantenimiento

En el pasado, las máquinas funcionaban hasta que se averiaban. Luego se reparaban. Este enfoque tenía dos desventajas fundamentales. Imaginemos un problema relativamente pequeño, como el desgaste de un rodamiento. Su cambio es fácil y rápido. Pero si el desgaste es grande, el rodamiento se gripa y todo el rotor deja de girar. Un rotor puede pesar varios cientos de kilogramos por lo que no se detiene tan fácilmente. Hay enormes fuerzas de inercia presentes que pueden destruir toda la máquina en cuestión de segundos. La reparación es entonces larga y costosa.

Otra desventaja es la parada repentina de la línea de producción, de nuevo como resultado del desgaste de un rodamiento. La línea, por ejemplo, produce productos por valor de un millón de coronas en una hora. Si la reparación dura varias horas, se produce una pérdida de varios millones.

El desarrollo posterior del sistema de mantenimiento llegó a la etapa de los reemplazos preventivos. Cada componente que se desgastaba con el tiempo se reemplazaba a intervalos de tiempo fijos. Mencionemos las desventajas fundamentales: los costos de mantenimiento son altos porque siempre se está reemplazando algo. En segundo lugar, en la mayoría de los casos, los componentes se reemplazan innecesariamente porque todavía están en buen estado. Y en tercer lugar, cada intervención de mantenimiento no es completamente perfecta. Por ejemplo, el montaje de un nuevo rodamiento se realiza de manera deficiente y el estado del rodamiento se deteriorará rápidamente, por lo que finalmente se producirá un fallo inesperado.

Posteriormente, apareció otro sistema de mantenimiento: el mantenimiento predictivo. El estado y el desgaste de la máquina se miden regularmente y, si se dete-

riora, se realiza una intervención de mantenimiento. Es decir, solo cuando es realmente necesario.

¿Pero qué métodos se pueden usar para medir el estado de la máquina?

El diagnóstico de vibraciones juega un papel absolutamente dominante en la medición del estado de la máquina. Puede medir con precisión la gravedad de todos los fallos básicos de la máquina. En los siguientes capítulos explicaremos todo lo necesario para su uso. No entraremos en detalles teóricos ni en fórmulas matemáticas, ya que no son necesarios para la realización exitosa de medidas de vibraciones ni para la posterior evaluación del estado de la máquina.

Antiguamente, las vibraciones aceptables se probaban con una moneda que se colocaba sobre la máquina. Si se caía, las vibraciones se consideraban altas.

Existen muchos otros métodos para medir el estado de la máquina, pero son muy especiales y de enfoque muy limitado. Ninguno de ellos alcanza el rendimiento del diagnóstico de vibraciones.

Medición

¿Qué necesitaremos? En primer lugar, un instrumento de medición, al que llamaremos analizador de vibraciones; un sensor de vibraciones y un cable con el que conectamos el sensor al instrumento. Equipados de esta manera, nos dirigimos a las máquinas. A esto lo llamamos una ruta. En cada máquina realizamos medidas que se almacenan en la memoria del instrumento. Después de regresar de la ronda, transferimos los datos medidos a un ordenador y los evaluamos.

Para realizar diagnósticos de vibraciones, utilizamos un programa proporcionado por el fabricante del analizador de vibraciones. En el programa creamos una lista de máquinas y allí almacenaremos los datos medidos.

Realizaremos las rondas a intervalos regulares: cuanto más frecuentes, mejor. Por supuesto, no se puede ir todos los días. El intervalo óptimo es de aproximadamente 2 semanas. Si tenemos máquinas cuyo funcionamiento es crucial para toda la fábrica, es más ventajoso equiparlas con sistemas en línea que midan constantemente.

Evaluación de los valores de medición

Ahora tenemos los datos en el ordenador y necesitan ser evaluados. Esto significa determinar el estado actual de las máquinas y, si es necesario, planificar reparaciones o ajustes. ¿Cómo hacemos esto? Hay varias formas de ver los valores medidos.

El uso de estándares

Si existe algún estándar, se puede utilizar. El estándar nos indicará los valores de los límites de vibración, generalmente, para el estado de advertencia y peligro.

Al superar el límite de advertencia, la máquina todavía se puede operar, pero debemos planificar un mantenimiento. La intervención debe realizarse lo antes posible. Superar el límite de peligro significa que la máquina debe ser parada inmediatamente y reparada. El estándar básico utilizado para esto es la norma ISO 20816.

¿Y si no hay estándares?

Entonces es necesario recurrir a otros procedimientos.

Si tenemos varias máquinas iguales o similares, podemos comparar los valores entre ellas. Si las vibraciones en cinco de seis máquinas iguales tienen un valor de 2 y en la sexta es de 8, entonces obviamente algo no está bien en la sexta máquina.

Otra posibilidad, y es la más utilizada, es el análisis de la tendencia de la evolución de los valores de vibración. Si la tendencia es estable a largo plazo, entonces el estado de funcionamiento de la máquina también es estable. Es decir, el estado de los rodamientos es bueno, el desequilibrio es aceptable, etc. Si los valores de vibración comienzan a aumentar, entonces está aumentando algún daño y es necesario reparar o ajustar la máquina, por ejemplo, realizar un equilibrado.

La tendencia, o la comparación con valores pasados, es la mejor manera de evaluar el estado de funcionamiento. Ya vemos un pequeño aumento, lo que significa que el deterioro del estado es aún pequeño y tenemos tiempo suficiente para planificar una intervención de mantenimiento.

¿Cuál es la tasa de éxito del diagnóstico?

Es similar al cuidado de la salud humana. Vamos a revisiones preventivas regulares, es decir, algo así como las rutinas. Los resultados de las revisiones son excelentes; estamos completamente sanos. Y, sin embargo, de repente tenemos un problema de salud que no se detectó durante las revisiones.

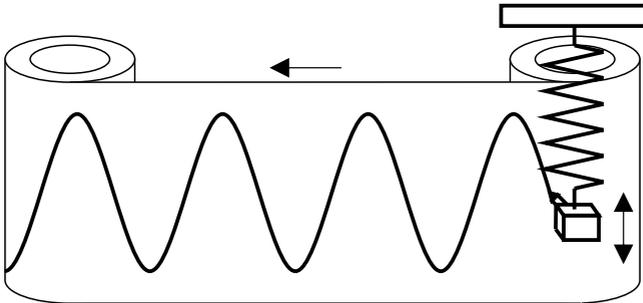
Lo mismo ocurre con el diagnóstico de vibraciones. Nunca tendrá un éxito del cien por cien. A veces, el fallo está demasiado oculto dentro de la máquina y no es fácil de encontrar en las vibraciones. O su desarrollo fue muy rápido y en la última ronda todo estaba todavía en orden.

También puede suceder que los valores medidos no nos parezcan todavía demasiado altos y sigamos operando la máquina. De repente, se produce un fallo inesperado. Entonces es necesario reducir los límites de advertencia y peligro. Así que incluso un fallo inesperado tiene un significado positivo para la evaluación futura.

El diagnóstico de vibraciones tiene una importancia absolutamente fundamental en el cuidado del estado de las máquinas. No existe otro tipo de diagnóstico que pueda detectar un espectro tan amplio de fallos y desgastes.

Forma de Onda

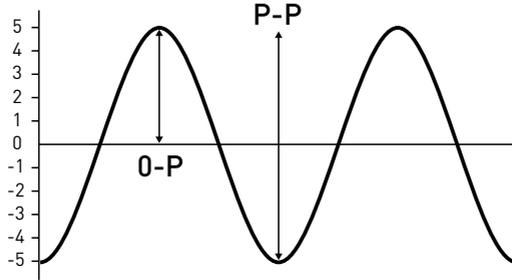
Las vibraciones son el movimiento oscilante y repetido de una masa entre dos posiciones extremas. No hay nada confuso en esta definición. Lo importante es si la amplitud de las vibraciones (es decir, la distancia entre las posiciones extremas) es aceptable para el funcionamiento de la máquina. La velocidad del movimiento oscilante también es importante.



Un resorte y una masa colgando de él es un buen ejemplo para entender las vibraciones y sus propiedades. Si estiramos y soltamos el resorte, la masa comenzará a oscilar hacia arriba y hacia abajo. La oscilación disminuirá debido a la resistencia del aire y la fricción interna del resorte hasta que se detenga por completo. Imaginemos que estas influencias no existen y que la oscilación no disminuye. Podemos sujetar un bolígrafo a la masa y poner una tira de papel detrás de ella. Ahora estiramos y soltamos el resorte y al mismo tiempo comenzamos a mover la tira de papel hacia la izquierda. El bolígrafo dibujará una curva. Esta forma de curva de las vibraciones es una forma básica y matemáticamente corresponde a la función seno. Llamaremos a la grabación en el papel señal de tiempo de las vibraciones y podemos evaluar otros parámetros de vibración útiles a partir de ella.

Amplitud de la vibración

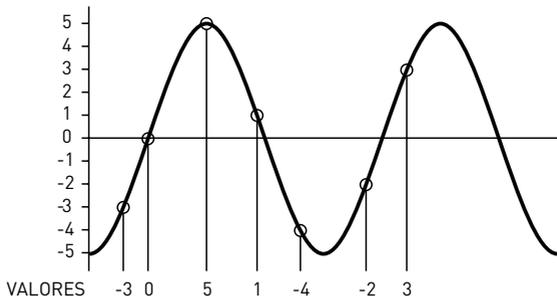
La amplitud de la vibración se puede medir fácilmente utilizando la amplitud 0-P. La llamamos valor de pico y es la distancia desde el valor medio de la señal (que corresponde a la posición de reposo del peso) hasta el valor máximo. En la figura, la amplitud 0-P es igual al número 5.



Para completar, debemos mencionar el valor P-P (Pico a Pico), que es la distancia entre los valores máximo y mínimo. Para una forma de señal simétrica, el valor P-P es el doble del valor 0-P. Pero muchas señales son asimétricas y esta relación no se cumple.

Digitalización de la señal

La tarea de la digitalización es convertir una señal analógica en números. La imagen muestra solo un ejemplo de algunos valores leídos de la señal. Seleccionamos un tiempo y leemos el valor. Lo llamaremos muestra en un tiempo definido. Esto es solo un ejemplo de lectura.



Frecuencia de muestreo

En primer lugar, necesitamos leer valores a intervalos de tiempo regulares (iguales). Por ejemplo, el intervalo entre lecturas será de 1 ms (1 ms = 0.001 seg). Si la longitud de la señal es, por ejemplo, de 1 seg, entonces obtendremos 1000 muestras, es una serie de 1000 números. En el futuro, siempre llamaremos a las lecturas individuales en una señal de tiempo como muestras. Si tenemos suficientes muestras, podemos aplicarles diversas fórmulas matemáticas y podemos calcular otros resultados diversos.

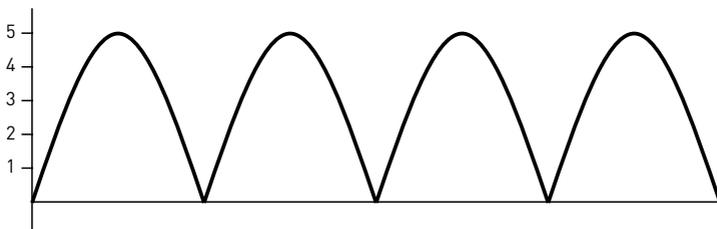
AVG – Valor medio

Hasta ahora, podemos medir la amplitud de la señal de tiempo como valores 0-P o P-P. La amplitud de la señal de tiempo también se puede medir como el valor medio de todas las muestras medidas. El valor medio se calcula como la suma de los valores de todas las muestras dividida por su número. Es lo mismo que el peso promedio de una manzana en una cesta. Sumamos los pesos de todas las manzanas y dividimos la suma por su número.

Ahora intentaremos sumar todos los valores de las muestras en la señal de tiempo y dividir por el número. Pero no es útil. La señal seno es simétrica alrededor de cero, por lo que el valor medio será cero. Debemos hacer algo diferente.

La solución es convertir la forma de onda de la señal solo a la mitad positiva. Lograremos esto trabajando con los valores absolutos de las muestras. Convierte los valores negativos en positivos, por ejemplo, el valor absoluto de -3 es +3. El valor absoluto de +3 permanece como +3, nada cambia aquí.

La nueva forma de la señal está en la imagen.



Si calculamos el valor medio AVG de la señal de la figura anterior, obtenemos 3.2. Para la función seno, el valor medio AVG siempre es igual a 0.64 multiplicado por el valor 0-P. En la imagen, el 0-P es igual a 5 y el promedio es $0.64 \times 5 = 3.2$.

!!! ¡Atención! No debemos aplicar esta conversión a señales que no tengan la forma de una función seno.

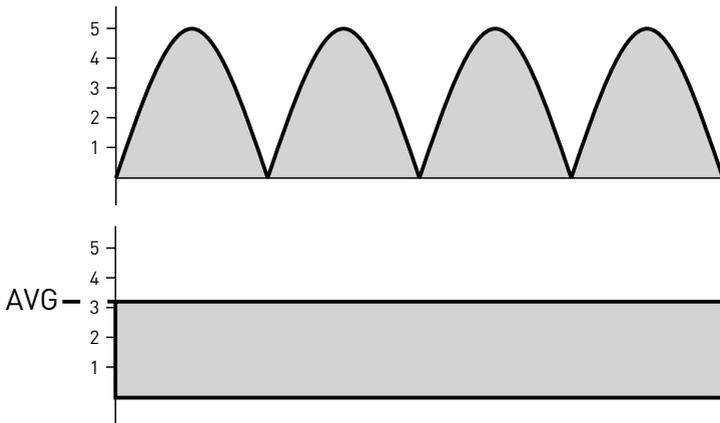
Para los lectores curiosos, también presentamos la fórmula matemática para una forma de onda de señal continua, que denotaremos como $f(x)$.

Entonces
$$AVG = \frac{\int_0^T f(x) dx}{T}$$

En nuestro caso, cuando $f(x) = |\sin(x)|$ entonces
$$AVG = \frac{\int_0^T |\sin(x)| dx}{T}$$

Podemos imaginar el valor medio de otra forma.

Rellenemos y midamos el área bajo la función seno. Matemáticamente, esto corresponde al cálculo de una integral definida, como mencionamos antes. Ahora dibujemos una señal cuyas muestras tengan todo el mismo valor. El área bajo esta señal se calcula como la longitud multiplicada por dicho valor de muestra, es decir, el área de un rectángulo. Nuestra tarea es encontrar un valor tal que las áreas de ambas señales sean idénticas.



Este valor deseado será igual a 3.2 ($0.64 * 5$). Solo quiero recordarles una vez más: esta conversión no es válida para señales que no tengan la forma de una función seno.

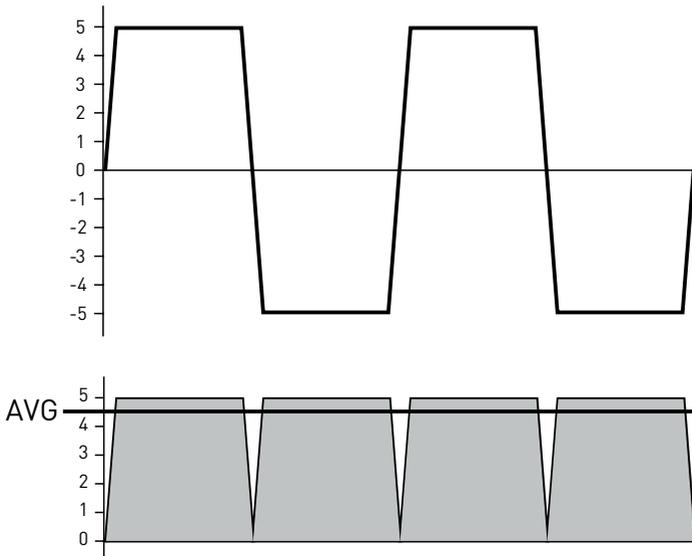
Volvamos al ejemplo de las manzanas. Por ejemplo, tenemos 20 de ellas de distintos pesos y su peso total es de 4 kg. El peso promedio es $4\text{kg}/20=200\text{g}$. Si tomamos 20 manzanas, cada una con un peso promedio de 200g, entonces juntas también pesarán 4kg. Este es el mismo razonamiento que sustituir una onda sinusoidal (irregular) por una señal en la que todas las amplitudes son iguales al valor medio. Por lo tanto, una línea recta.

Influencia de la forma de onda en el valor medio

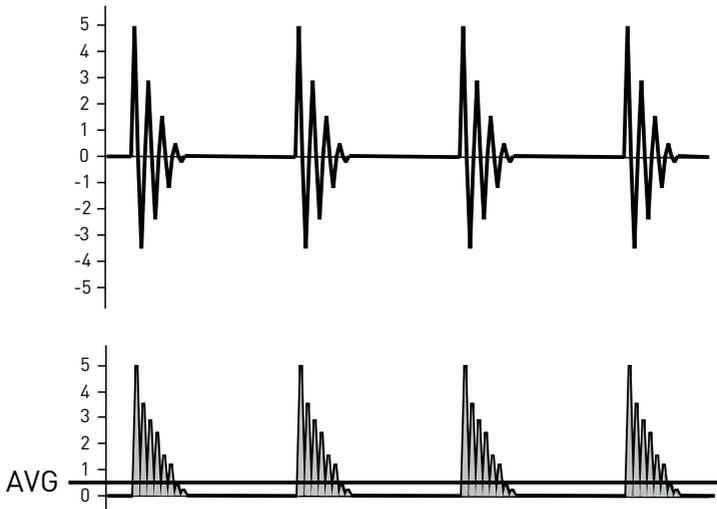
Lo explicaremos con los siguientes ejemplos.

Ya describimos el caso de una onda sinusoidal. El valor medio es igual al valor 0-P multiplicado por 0.64.

Cuando calculamos el valor medio a partir de una forma de onda rectangular, después de convertir a un valor absoluto, vemos casi lo mismo que después de convertir a un rectángulo. De ello se deduce que el valor medio AVG es casi igual – solo ligeramente menor – al valor 0-P.



Si la señal contiene únicamente impactos, ocurre lo contrario: el área dentro de los pulsos es pequeña y, por lo tanto, la altura del rectángulo que usamos para derivar el valor medio (AVG) también resulta pequeña.



Con esto hemos demostrado que no existe una relación fija entre el valor medio y el valor de pico.

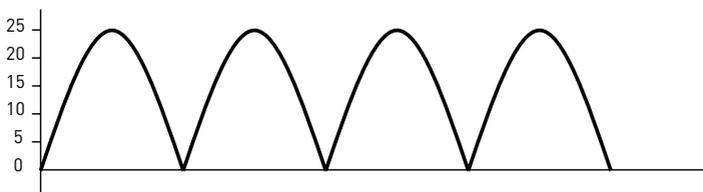
Valor RMS

El valor medio funcionaría bien como un indicador del tamaño de las vibraciones, pero en la práctica no se utiliza. En su lugar, se utiliza un valor similar, al que llamamos RMS (Raíz Cuadrática Media).

Su ventaja es que representa la energía contenida en la señal. Podemos imaginarlo como el nivel de fuerza que posteriormente causa vibraciones bajo el concepto de energía.

Por ejemplo, en caso de desequilibrio, la fuerza centrífuga es la que genera problemas: hace vibrar toda la máquina, somete los tornillos de fijación a tensiones y sobrecarga los rodamientos. Por lo tanto, tratamos de reducir el tamaño de esta fuerza tanto como sea posible. Y esto es equivalente a tratar de reducir las vibraciones. Si reducimos las vibraciones, hemos reducido la fuerza que actúa sobre la máquina.

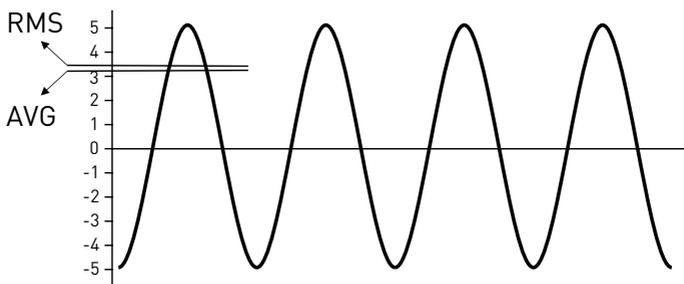
¿Cómo se calcula el RMS? Es procedimiento es similar al del valor medio, pero con una diferencia: primero se elevan al cuadrado todas las muestras de la señal, lo que a la vez garantiza que sea positivas. Después, se calcula la raíz cuadrada del valor medio.



En la figura observamos la señal \sin^2 . La amplitud máxima ha aumentado a 25, lo que corresponde a 5^2 , siendo 5 el valor máximo en la señal original. A continuación, calculamos el valor medio y calculamos la raíz cuadrada.

Si la forma de onda de la señal corresponde a una función seno, entonces el valor RMS es igual al valor de pico 0-P multiplicado por 0.71. Con un valor de pico de 5, obtenemos $\text{RMS}=3.55$. Este resultado puede representarse nuevamente como una señal constante (rectángulo) con una altura de 3.55 y una anchura igual a la duración de la señal.

Me gustaría recordarles de nuevo que la constante de conversión 0.71 solo se puede aplicar a una forma de onda sinusoidal. La explicación es la misma que mostramos para el valor medio.



Un poco de matemáticas

Consideremos una señal digitalizada y . Es decir, tenemos una secuencia de muestras $\{y_i\}_{i=1}^N$, tenemos N valores de muestra.

$$\text{Entonces } \text{AVG} = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i|}{N} \quad \text{y} \quad \text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N}}$$

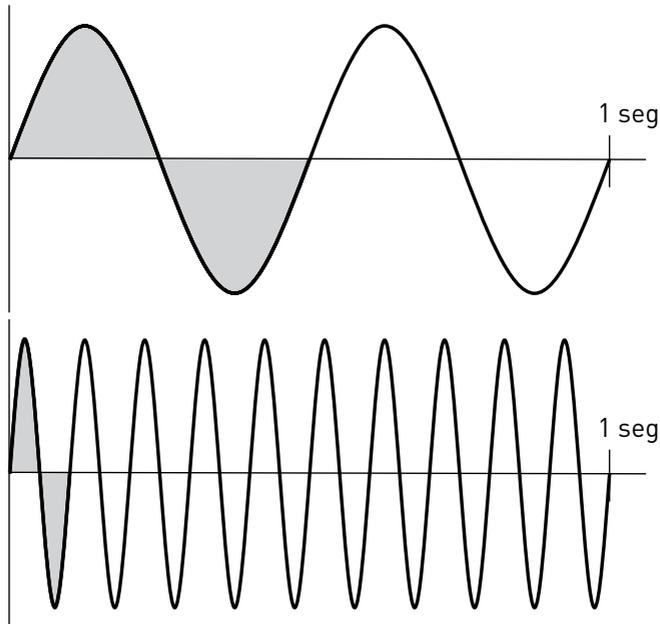
Independencia de la longitud de la señal

Para los lectores curiosos, solo agregaré la información de que tanto los valores AVG como RMS no dependen de la duración de la señal. En otras palabras, una señal más larga no genera valores más grandes. La razón es clara: ambos son valores medio (dividimos por el número de muestras N). Si la señal contiene más

muestras, la suma será mayor, pero al dividir por el número de muestras se obtiene el mismo valor que para una señal más corta. Los valores RMS y AVG se mantienen estables para ambas señales. Para máquinas con velocidades superiores a 10 Hz (600 RPM), es suficiente medir una señal con una longitud de 1 segundo. Para máquinas de baja velocidad, la medición debe ser más prolongada: la señal debe contener al menos 10 revoluciones. Esto significa que a una velocidad de 2 Hz medimos al menos 5 segundos (una revolución dura 0.5 segundos).

¿Qué es la frecuencia?

Las diferencias en la rigidez de los resortes y en las masas afectan tanto la amplitud como la frecuencia de las vibraciones. La frecuencia es cuántos períodos de movimiento, hacia arriba y hacia abajo, realiza la masa en un tiempo dado, generalmente 1 segundo.



En la imagen, podemos ver dos señales de tiempo, ambas con una duración de 1 segundo. En la parte superior, la masa ha alcanzado la posición mínima y máxima dos veces en 1 segundo. En la parte inferior, el movimiento de la masa fue más rápido y alcanzó el mínimo y el máximo diez veces. Está claro que la masa sigue repitiendo el movimiento hacia arriba y hacia abajo. ¿Cuál es el movimiento básico (el más corto) que se repite periódicamente? Este movimiento básico de subida y bajada está relleno en la figura. A su longitud la llamamos período. Dado que toda la grabación dura 1 segundo, el período de la vibración más lenta en la parte superior dura 500 ms. El período de la vibración más rápida en la parte inferior dura 100 ms.

La frecuencia se calcula en Hz y nos indica cuántas veces en un segundo se repite un movimiento periódico. En nuestro ejemplo anterior, la frecuencia es igual a 2 Hz (2 veces el período) y el de debajo es de 10 Hz (10 períodos por segundo). Si denotamos la longitud del período como T, entonces la frecuencia se expresa como:

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{si } T \text{ está en segundos}),$$

o alternativamente:

$$f = \frac{1000}{T} \quad (\text{si } T \text{ está en milisegundos}).$$

Frecuencia de la velocidad de la máquina

Incluso la velocidad (la rotación) es un movimiento repetitivo, donde el período básico es una rotación del eje. La frecuencia de rotación también se puede expresar en Hz, es decir, el número de rotaciones por 1 segundo. A esta la llamaremos frecuencia de velocidad o, simplemente, velocidad.

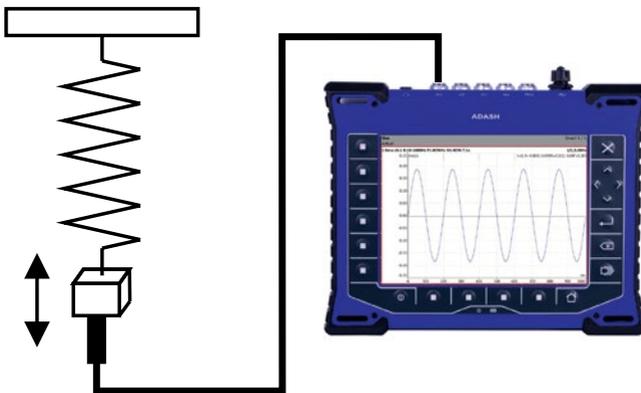
Más comúnmente se mide en RPM. Este valor indica cuántas veces gira el eje en un minuto. La conversión es obvia:

$$\text{RPM} = \text{Hz} * 60 \quad \text{y} \quad \text{Hz} = \frac{\text{RPM}}{60}$$

El número es 60 porque un minuto tiene 60 segundos.

Sensor de vibración

Un sensor de vibración es un dispositivo que convierte las vibraciones en una señal eléctrica.



La imagen muestra el sensor conectado a la masa. Si la masa vibra, aparece una señal eléctrica en la salida del sensor, la cual medimos en el analizador. El instru-

mento muestra entonces la forma de onda de la vibración, la misma forma de onda que anteriormente dibujamos en papel.

Analogía con el voltaje alterno en la red eléctrica

Es similar a medir el voltaje en la red eléctrica. Este también tiene una amplitud cuyo valor RMS es de 230 V - en los EE. UU. es de 110 V.

En la red eléctrica, el voltaje tiene una forma de onda que corresponde a la función seno, por lo que ya podemos calcular que el valor 0-P en la red es $230/0.71=324$ V o $110/0.71=155$ V.

La frecuencia de la red es de 50 Hz o 60 Hz en los EE. UU., lo que significa que la duración de un período es de 20 ms o 16.7 ms.

¿Frecuencias de vibración y qué hacer con ellas?

Ya hemos explicado la frecuencia. ¿Pero cuál es su importancia en el diagnóstico de máquinas? Es fundamental: diferentes fallos se manifiestan en vibraciones de diferentes frecuencias. ¿Cuáles? Lo explicaremos más adelante.

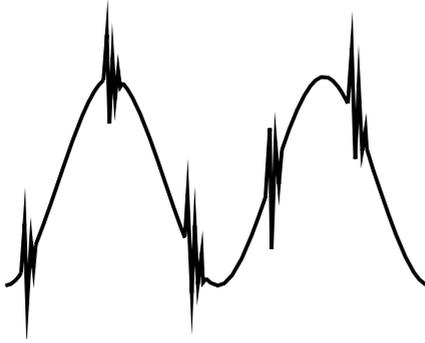
También sabemos ya que el valor RMS se utiliza como medición básica para medir la magnitud de la vibración. Este valor se mide en cualquier forma de vibración, no solo en la forma de seno.

Imaginemos que colocamos un sensor de vibración en un altavoz y reproducimos música. El altavoz vibra y escuchamos la música. Si conectamos la señal del sensor a un analizador de vibraciones, podemos medir fácilmente el valor RMS. La música contiene una amplia gama de frecuencias. Hay frecuencias graves, medias y altas. En un amplificador de audio, generalmente tenemos tres potenciómetros que usamos para ajustar la amplitud (es decir, la fuerza) de las frecuencias bajas, medias y altas. Si ajustamos las frecuencias graves al máximo y las medias y altas al mínimo, entonces solo escuchamos tonos graves. Si ahora medimos el valor RMS, este es el valor de la vibración a bajas frecuencias. Ahora ajustamos los graves y los medios al mínimo y los altos al máximo, entonces escuchamos y medimos solo la vibración a altas frecuencias.

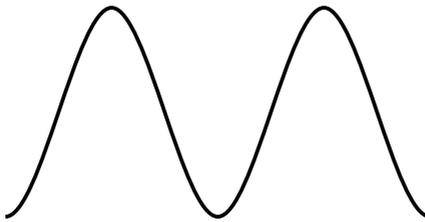
El diagnóstico de vibraciones funciona de la misma manera. Algunos fallos se presentan a bajas frecuencias (por ejemplo, el desequilibrio), mientras que otros fallos ocurren a altas frecuencias (por ejemplo, el estado de los rodamientos).

Si configuramos los parámetros de medición del valor RMS en el instrumento, siempre tenemos que establecer qué frecuencias queremos medir y, por lo tanto, mantenerlas en la señal y qué frecuencias no queremos medir y, por dicho motivo, eliminarlas de la señal. Siempre definimos un filtro pasa banda con frecuencias

F_{min} y F_{max} . Esto significa que todas las frecuencias inferiores a F_{min} y todas las frecuencias superiores a F_{max} se eliminan de la señal.



La figura muestra una señal de tiempo simple que contiene un componente sinusoidal a baja frecuencia y choques vibratorios a altas frecuencias. Si configuramos la medición de frecuencia para que la baja frecuencia pase y la alta frecuencia se filtre (filtrado de paso bajo "LowPass"), mediremos una señal que se ve así:



Si filtramos las bajas frecuencias y dejamos pasar los choques (filtrado de paso alto "HighPass"), mediremos una señal que se ve así:



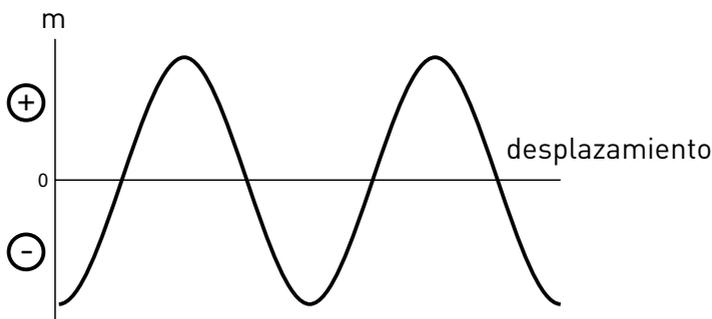
Para eliminar las altas frecuencias, podemos definir, por ejemplo, $F_{min}=10$ Hz y $F_{max}=500$ Hz.
Para eliminar las bajas frecuencias, podemos definir, por ejemplo, $F_{min}=5000$ Hz y $F_{max}=25000$ Hz.

Unidades SI

Toda medición de cualquier cosa debe tener su unidad física correspondiente. Por ejemplo, la masa se mide en kilogramos, el tiempo se mide en segundos. Las unidades físicas utilizadas en diferentes partes del mundo pueden variar según su región del mundo. Para asegurar compatibilidad y uniformidad, se introdujo el Sistema Internacional de Unidades (SI), cuyo principio es garantizar los mismos valores para medir cantidades independientemente de dónde en el mundo se midan. Las unidades SI básicas incluyen, entre otras: el segundo (s, sec, unidad de tiempo), el metro (m, unidad de longitud), el kilogramo (kg, unidad de masa) y otras.

Medición de desplazamiento

Esta parte será un poco más desafiante de entender.



Volvamos al ejemplo del resorte y la masa a la que fijamos un bolígrafo. El bolígrafo dibuja en el papel en movimiento la forma de las vibraciones. Pero, ¿cuál es la unidad de ese gráfico? Si queremos medir cualquier proceso, siempre debemos definir su unidad física. ¿Cuál es la unidad de la vibración de la masa en un resorte? Es obvio que el bolígrafo dibuja la posición de la masa en función del tiempo. O, dicho de otro modo, está representando el desplazamiento de la masa a lo largo del tiempo.

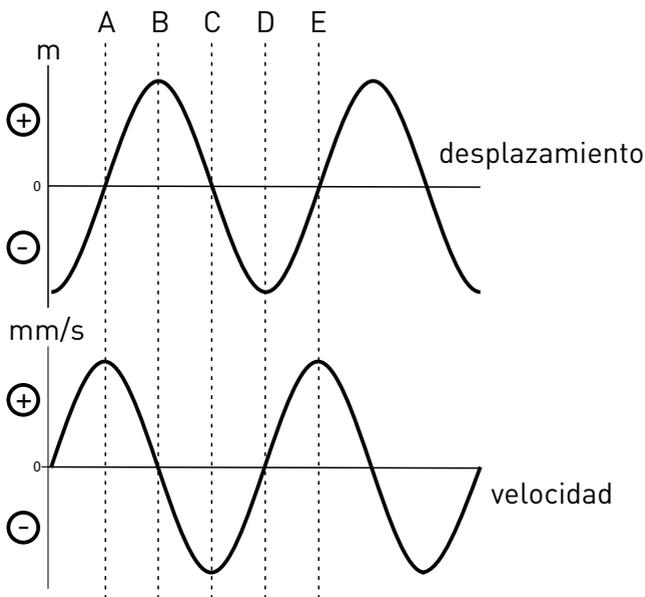
La unidad SI del desplazamiento es el metro (m). También se puede convertir a cm, mm, μm , pulgada o milipulgada (1 mil = 0.001 pulgadas).

Si el peso se mueve hacia arriba, nos referiremos a esta dirección como más (positiva). La dirección hacia abajo se denominará menos (negativa). Suponemos que los valores en la parte superior son positivos y los valores en la parte inferior, negativos.

Medición de velocidad

También podemos medir otras magnitudes. La masa se mueve repetidamente hacia arriba y hacia abajo. Podemos montar un tacómetro en la masa que funcionaría de manera similar a un tacómetro en un coche. Ahora podemos medir la velocidad del movimiento de la masa. Nuestro tacómetro tiene cero en el centro. La aguja podría desviarse hacia la derecha (dirección positiva) o hacia a la izquierda (dirección negativa), dependiendo de si la masa se desplaza hacia arriba (dirección positiva) o hacia abajo (dirección negativa). Si un tacómetro así estuviera en un coche, mostraría tanto la velocidad hacia adelante como la velocidad en reversa.

Está claro que, en el caso de un resorte, la velocidad tampoco será constante. ¿Cuándo será mayor la velocidad? Eso también está claro, la masa se mueve más rápido cuando pasa por la posición media. ¿Y cuándo será más pequeña? No solo será la más pequeña: será cero en los puntos de desplazamiento máximo o mínimo. Es fácil de imaginar: en estas posiciones extremas, la masa se detiene por completo porque necesita cambiar de dirección.



Por lo tanto, no es sorprendente que si la forma del desplazamiento corresponde a una función seno, la forma de la velocidad también será la función seno. En la figura, podemos ver la forma de onda del desplazamiento y, debajo, la forma de onda de la velocidad. Podemos ver que la forma de onda de la velocidad está desplazada hacia la izquierda respecto al desplazamiento, exactamente en un cuarto de período.

do. Si la longitud del período es T , entonces el desplazamiento será $T/4$ hacia la izquierda, se retrasa en el tiempo.

También podríamos decir que la forma de onda de la velocidad está desplazada $3/4 \cdot T$ hacia la derecha. Esto también es correcto. Podemos contar el desplazamiento en ambas direcciones porque el movimiento se repite periódicamente.

¿Cuál sería la unidad física? Es velocidad, cuya unidad SI es metro por segundo (m/s). Pero para las vibraciones, obtendríamos valores muy pequeños en m/s. En la práctica, usamos mm/s o pulgada/s.

La figura muestra las posiciones de tiempo A, B, C, D, E. En la posición A, el peso se mueve (dirección positiva), justo pasando por la posición media y alcanza la velocidad máxima positiva.

Después de dejar la posición A, la masa se acerca a la posición B. Su desplazamiento desde la posición central aumenta. La velocidad es positiva, porque es un movimiento ascendente. Pero la velocidad disminuye gradualmente a medida que el movimiento se detiene en la posición B. Ahora la velocidad es cero, el desplazamiento positivo alcanza el valor máximo.

Después de dejar la posición B, la masa se acerca a la posición C, donde pasa por la posición media. De B a C la velocidad aumenta en la dirección negativa (la masa se mueve hacia abajo). En el punto C, la velocidad negativa es la más alta.

Después de la posición C, la masa se acerca a la posición D, que es el desplazamiento negativo máximo (hacia abajo). La velocidad negativa disminuye. La masa invierte la dirección del movimiento en D, donde la velocidad es cero.

Después de dejar la posición D, la masa se mueve hacia arriba, por lo que la velocidad es positiva. La masa alcanza la posición media E y el proceso se repite. La posición E es igual a A.

En lo que respecta a los valores de velocidad, son positivos (más) cuando la masa se desplaza hacia arriba (hemos marcado este movimiento como más). Los valores de velocidad son negativos (menos) cuando la masa se desplaza hacia abajo.

Medición de aceleración

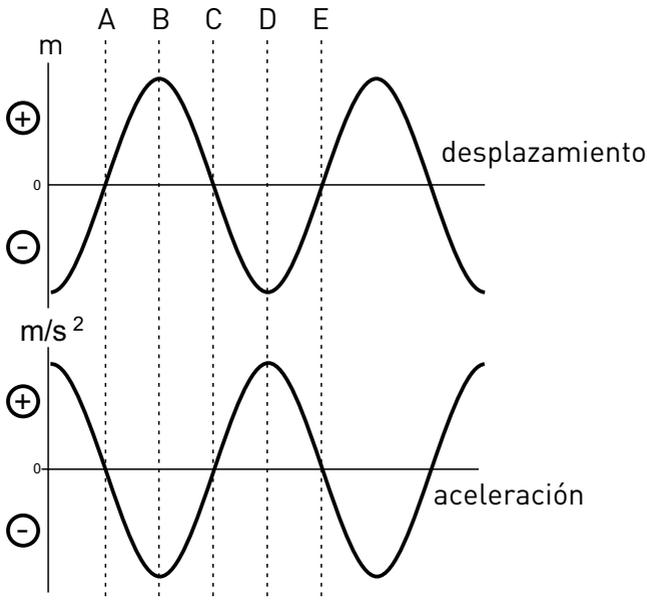
La última magnitud utilizada es la aceleración. Su naturaleza física de la aceleración es el cambio de velocidad. Una roca en caída libre acelera debido a la fuerza de la gravedad. Y ese es un muy buen ejemplo. Para que un objeto acelere o desacelere, siempre debe actuar una fuerza sobre él. Para acelerar un coche, debe actuar la fuerza del motor (es decir, aceleración positiva en la dirección de la velocidad, es decir, en la dirección del movimiento). En el caso opuesto, para desacelerar, debe actuar la fuerza de los frenos (esto es una aceleración negativa opuesta a la dirección de la velocidad, es decir, la dirección del movimiento).

Además, nuestra masa en el resorte está expuesta a la fuerza generada por el resorte. Si comprimimos el resorte, este crea una fuerza contra la compresión

e intenta volver a la posición central. Sin embargo, cuando la masa llega a la posición central, el movimiento no se detiene. La inercia hace que la masa continúe moviéndose a través de la posición media, donde comienza a estirar el resorte y el resorte estirado crea una fuerza en la dirección opuesta, que quiere devolver la masa a la posición central. Este proceso se repite.

La fuerza es, en realidad, el equivalente de la aceleración. La fórmula $F = m \cdot a$ describe la relación entre masa, fuerza y aceleración. Como la masa m es constante, podemos ver que la aceleración está directamente relacionada con la fuerza.

En la siguiente figura podemos ver el desplazamiento y la aceleración. Podemos ver que la forma de onda de la aceleración está desplazada medio período hacia la izquierda con respecto a la de desplazamiento. Comparándola con la forma de onda de la velocidad, podemos ver que la forma de onda de la aceleración está desplazada un cuarto de período hacia la izquierda, es decir, hacia atrás en el tiempo. No resulta sorprendente que la forma de onda de la aceleración corresponda nuevamente a una función seno.



La comprensión en este caso es un poco más complicada, pero vamos a desglosarla. Describamos las posiciones de la A a la E y los procesos intermedios.

- A La masa pasa por la posición media con velocidad máxima. La velocidad aumentaba antes de A y comienza a disminuir después de A. Es la posición media, el resorte no está comprimido ni estirado. No hay ninguna fuerza actuando en el punto A. Por lo tanto, la aceleración es cero. Si queremos

- imaginar la posición de A en un coche, antes de A pisamos el acelerador y aceleramos. En A movemos el pie del acelerador al freno y después de A pisamos el freno y desaceleramos.
- A-B La inercia impulsa la masa hacia arriba, comprimiendo el resorte. El resorte genera una fuerza hacia abajo, y la fuerza es mayor cuanto más se comprime. El movimiento de la masa sigue siendo positivo (movimiento ascendente), pero la aceleración es negativa (es decir, fuerza contraria al movimiento). La masa reduce gradualmente su velocidad.
 - B La fuerza del resorte comprimido detuvo el movimiento ascendente. La masa cambia de dirección de movimiento a negativa (hacia abajo), la velocidad es cero. Sin embargo, como el resorte aún está comprimido, sigue generando una fuerza negativa (hacia abajo) que inicia el movimiento descendente de la masa.
 - B - C La fuerza del resorte comprimido sigue empujando la masa hacia abajo y acelera su movimiento (dirección negativa). Sin embargo, esta fuerza disminuye gradualmente. Cuanto menos comprimido esté el resorte, menos fuerza genera. Por lo tanto, la masa sigue acelerando hacia abajo, pero esta vez menos.
 - C La masa pasa por la posición media. Este es el estado neutro del resorte, cuando no está ni comprimido ni estirado y no genera ninguna fuerza. La aceleración es cero.
 - C - D La inercia mantiene el movimiento descendente (negativo) y el resorte se estira. Generando una fuerza ascendente en contra del movimiento descendente. Ahora tenemos una batalla entre la inercia y la resistencia del resorte. La fuerza generada por el resorte sigue reduciendo la inercia hasta que la anula por completo. Quiere devolver la masa a la posición central.
 - D La fuerza del resorte extendido detiene el movimiento descendente. La velocidad es cero y la dirección del movimiento cambia a positiva. El resorte estirado sigue generando una fuerza positiva hacia arriba y la masa comienza a moverse hacia arriba también.
 - D - E La masa acelera hacia arriba.
 - E Aquí, todo el período de movimiento se ha completado. La fuerza de inercia comienza de nuevo a comprimir el resorte. Hemos llegado a la misma situación que en la posición A.

La máquina también es una masa sobre resortes

Hasta ahora hemos mostrado ejemplos de vibraciones con un peso y un resorte. ¿Tiene esto relación con las vibraciones reales en una máquina?

Sí, es exactamente lo mismo. La máquina es una masa montada sobre una base mediante resortes. Si existen bloques de goma silenciosos, entonces podemos ver resortes reales. Pero incluso si la máquina está fija con tornillos, estos también poseen elasticidad: pueden alargarse y acortarse. Simplemente se necesita mucha fuerza para hacerlo.

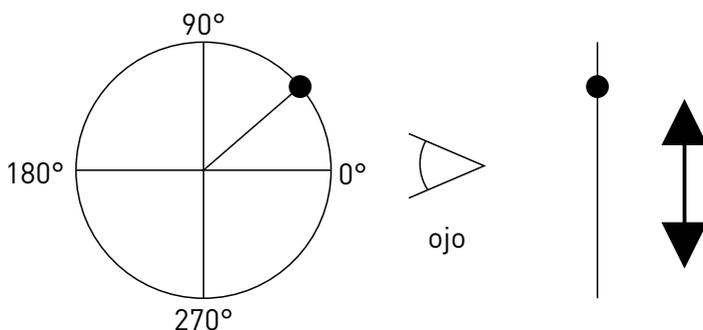
La fuerza que hace vibrar la máquina es, en la mayoría de los casos, el desequilibrio. Un punto pesado existe en el rotor y crea una fuerza centrífuga al girar, lo que provoca la vibración.



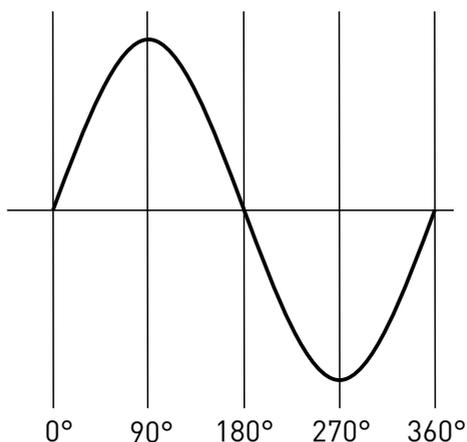
El icono del peso blanco muestra la posición del punto pesado cuando los resortes están comprimidos y extendidos.

Período y fase

En la descripción del desplazamiento, la velocidad y la aceleración, necesitábamos expresar el desfase de una señal con respecto a la otra. A este desfase lo llamamos desfase de fase. Hemos utilizado expresiones como un cuarto de período o medio período. El desfase también podría definirse en tiempo (en segundos). Pero esto tiene la desventaja de que el tiempo del período de que diferentes frecuencias es diferente. En la práctica, por lo tanto, se utiliza un enfoque diferente.



Imaginemos que tenemos una bola atada a una cuerda y la estamos balanceando en un círculo. Mirando desde el frente, vemos que la bola está girando alrededor del centro. Pero mirando desde los lados, vemos la bola vibrar entre dos posiciones extremas. Se parece a una masa en un resorte. Cuando medimos la forma de onda de este movimiento, nuevamente obtenemos una forma que corresponde a la función seno.



Este enfoque nos permite imaginar un período como un valor angular. La bola da una vuelta completa al círculo durante un período. El círculo tiene 360 grados. Por lo tanto, la duración de un período también se puede considerar como 360 grados. La ventaja de este enfoque es que no depende de la frecuencia. Por lo tanto, no importa cuánto dure un período en segundos. Angularmente, simplemente siempre dura 360 grados. Si luego queremos decir que la forma de onda de la velocidad está desfasada un cuarto de período a la izquierda (es decir, contra el tiempo), entonces decimos que está desfasada menos 90 grados. 90 es un cuarto de 360 y el signo menos representa la dirección contra el tiempo.

Así que ahora sabemos que el desfase de fase se mide en grados.

DetECCIÓN Y ANÁLISIS

El diagnóstico de vibraciones tiene dos tareas básicas en la práctica. La primera es determinar si la condición de la máquina ha cambiado. Esto se llama detección de problemas. La segunda es analizar la vibración más a fondo y descubrir qué fallo o desgaste ha ocurrido en la máquina.

Las medidas de detección deben ser simples y rápidas para que podamos medir las máquinas con la mayor frecuencia posible. Las medidas globales son las más utilizadas. El significado de la palabra global es que la medición cubre una amplia banda de frecuencias. El valor medido puede ser RMS (que es el más utilizado), 0-P, P-P y otros.

Medición global

Si queremos decirle a alguien qué valor global hemos medido, siempre tenemos que decirle cuatro parámetros. Si decimos que medimos 4.8, es completamente inútil. Si añadimos una unidad y es 4.8 mm/s, es un poco mejor. También necesitamos añadir información sobre qué tipo de cálculo usamos (por ejemplo, RMS). Así que obtenemos 4.8 mm/s_{RMS}. Y la cuarta información es qué banda de frecuencia medimos, es decir, qué filtro pasa banda se usó (por ejemplo, 10-1000 Hz).

Así que, la expresión correcta es 4.8 mm/s_{RMS} en la banda de 10-1000 Hz.

Recuerda siempre esta regla de cuatro.

Si el tipo de cálculo a veces no se menciona en el texto o en los gráficos, entonces no importa si medimos RMS o 0-P.

Tipos de sensores

Si sabemos que podemos medir el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de las vibraciones, también deberíamos decir con qué medimos en la práctica. En la mayoría de los casos, se utilizan sensores de aceleración para las medidas. Son asequibles y pueden medir en un amplio rango de frecuencias. La ventaja es que podemos convertir la señal de aceleración en velocidad y desplazamiento con bastante facilidad.

Hay algunas complicaciones para frecuencias muy bajas y muy altas, pero lo discutiremos más adelante.

Montaje del sensor en la máquina

Para medir las vibraciones de la máquina con precisión, el sensor debe montarse correctamente en la máquina. En primer lugar, debemos garantizar la repetibilidad de la medición. Esto significa que debemos medir siempre en el mismo lugar y el sensor debe montarse siempre de la misma manera. En ningún caso debemos sostener el sensor con la mano y simplemente presionarlo contra la superficie de la máquina. El método de montaje influye principalmente en las medidas a altas frecuencias. En la práctica, se utiliza el montaje con un imán. Sin embargo, el imán no puede simplemente presionarse contra la superficie de la máquina, ya que no es plana y el sensor podría oscilar durante la medición. Esto distorsionaría el valor medido y no podríamos repetir la medición y obtener el mismo valor. Por esta razón, se pegan bases de medición a la máquina. Estas son de acero inoxidable, magnéticas y tienen una superficie completamente plana. El sensor con el imán se adhiere perfectamente a la base, lo que garantiza la repetibilidad de la medición. También se garantiza que siempre medimos en el mismo lugar.



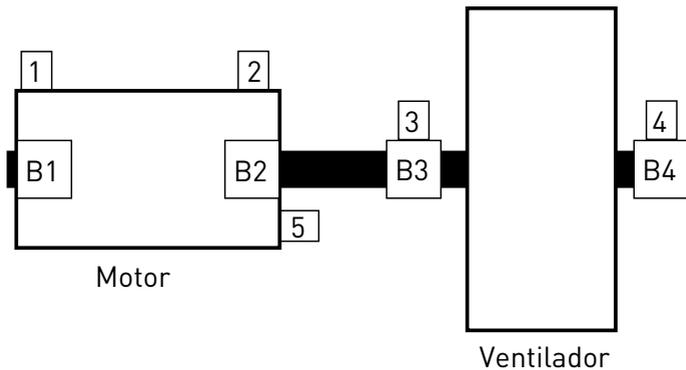
¿Dónde medir la vibración en la máquina?

Primero, expliquemos qué son las direcciones de medición radial y axial, es decir, en qué dirección montamos el sensor en la máquina.

La dirección radial es la dirección perpendicular al eje de rotación, es decir, perpendicular al eje. Con un eje horizontal, es bastante indiferente si se monta verticalmente, horizontalmente o diagonalmente. En un eje vertical no tiene efecto.

La dirección axial es la dirección paralela al eje de rotación, es decir, paralela al eje.

Para medir el estado del rodamiento, debemos colocar el sensor cerca del rodamiento. Sin importar en qué dirección. Generalmente, se utilizan las direcciones radiales.



La imagen muestra una configuración típica de máquina, que consiste en un motor y un ventilador. Tenemos 4 rodamientos marcados de B1 a B4. En cada rodamiento se mide radialmente (sensores 1 a 4) y una vez en la máquina axialmente (sensor 5).

Medición de la velocidad

La velocidad se mide con un sensor de velocidad. Lo llamamos sonda tacométrica. Esta sonda emite un rayo láser que apuntamos al eje giratorio. Colocamos una pequeña cinta reflectante en el eje. Ahora conectamos la sonda tacométrica al analizador y este recibe los reflejos del eje. Cuando el rayo se refleja en la cinta, la sonda envía un pulso de voltaje. Luego, el analizador mide el tiempo T (en realidad es el período de rotación) entre los pulsos y puede calcular la velocidad como $1/T$.



¿Qué valores medir al principio?

Siempre comenzamos con valores RMS globales. No piense que esto es algo menor. Podemos hacer diagnósticos de vibraciones con ellos con excelentes resultados. Luego podemos añadir métodos más sofisticados. No tiene sentido usar procedimientos que no entendemos completamente. También es un error común pensar que el diagnóstico de vibraciones es tan fácil como medir la temperatura o la presión. Que todo lo que se necesita es un día de formación para convertirnos en expertos. Un día de formación nos muestra cómo empezar fácilmente para tener resultados inmediatamente. Luego, nos tomará mucho tiempo desarrollarnos y comprender gradualmente procedimientos aún más complejos. Ser un experto en diagnóstico de vibraciones garantizará que siempre encontrará empleo muy fácilmente porque sabrá algo que otros no saben. Y cada fábrica desea conocer el estado de sus máquinas y prevenir averías inesperadas.

Si utiliza los analizadores de vibraciones Adash, encontrará tanto medidas básicas como parámetros preestablecidos como medidas avanzadas en las que podrá configurar todos los parámetros según sus requisitos.



¿Cuáles son los fallos básicos de la máquina?

Hay dos grupos básicos de fallos en una máquina. El primero corresponde a los fallos mecánicos. Estos son:

Desequilibrio – cuando el rotor giratorio tiene un punto pesado, esta masa genera una fuerza centrífuga que hace vibrar la máquina. Es lo mismo que ocurre con una rueda desbalanceada en un coche.

Holgura – la máquina está fijada a la base mediante pernos y, si alguno de ellos ha perdido rigidez o incluso se rompe, entonces el fallo es la holgura.

Desalineación – por ejemplo, cuando el motor está conectado a la bomba mediante un acoplamiento y sus ejes no están en línea recta, entonces estamos hablando de desalineación.

Medimos los valores en velocidad para fallos mecánicos, en RMS y generalmente en la banda de 10 Hz a 1000 Hz. Si la velocidad es inferior a 10 Hz (es decir, 600 RPM), entonces medimos desde, por ejemplo, 2 Hz.

El segundo grupo incluye el desgaste de los rodamientos, defectos en los engranajes de la caja de cambios, etc. Aquí realizamos medidas en aceleración, en RMS y generalmente en la banda de 500 Hz hasta el rango máximo del analizador. Esto suele ser 25 kHz. La aceleración se mide más a menudo en g, que corresponde al valor de la aceleración de la gravedad. $1\text{ g} = 9.81\text{ m/s}^2$, donde m/s^2 es la unidad SI. Si g tiene que convertirse a m/s^2 , basta con multiplicar por diez.

¿Cómo evaluar los valores medidos?

Hemos medido los primeros valores. ¿Qué hacemos ahora?

Existen estándares para fallos mecánicos que establecen valores límite para una buena condición, de advertencia y de peligro. Si se supera el límite de advertencia, la máquina aún puede funcionar, pero las reparaciones deben programarse. También deberíamos medir la máquina con más frecuencia, ya que un fallo ya presente puede empeorar rápidamente. Superar el límite de peligro debería significar apagar la máquina y hacer que la reparen o ajusten.

El estándar más utilizado es el ISO 20816, que contiene varias categorías de máquinas y especifica sus límites de vibración. Utiliza la medición de velocidad de la vibración para detectar fallos mecánicos.

Desafortunadamente, no hay estándares para la condición de los rodamientos. Los límites comúnmente utilizados tienden a estar alrededor de 1 g_{RMS} para el límite de advertencia y 2 g_{RMS} para el límite de peligro. Solo medimos frecuencias más altas, generalmente $F_{\text{min}}=500\text{ Hz}$.

Si tenemos varias máquinas del mismo tipo, podemos comparar los valores entre estas máquinas. Por ejemplo, si medimos 1.5, 1.7, 1.4, 5.6 y 1.3 mm/s_{RMS} en cinco máquinas, entonces está claro que la máquina 4, con un valor de 5.6, no está en buen estado.

Si ya hemos medido varios valores en un lugar, por ejemplo, con una semana de diferencia, podemos observar la tendencia. Y usamos las siguientes reglas: Si los valores son más o menos los mismos en la tendencia ($\pm 15\%$), entonces la máquina está funcionando en una condición estable y no reparamos nada en ella. Si los valores están aumentando, entonces hay un fallo y debemos abordarlo.

Si tenemos valores estables en la tendencia al principio, los tomamos como referencia. Luego podemos establecer el límite de advertencia al doble de la referencia y el límite de peligro a cinco veces la referencia.

¡Cuidado con la velocidad!

Si la máquina siempre trabaja a la misma velocidad, los valores medidos no se ven afectados por la velocidad. Pero cuidado con las máquinas que cambian de velocidad.

El valor de la medición también cambia cuando la velocidad cambia, incluso si la condición de la máquina es la misma. Por ejemplo, en el caso de el desequilibrio, la fuerza centrífuga aumenta a medida que aumenta la velocidad y, por lo tanto, el valor de la vibración aumenta. Lo mismo ocurre con el desgaste de los rodamientos. Si hay picaduras en las pistas donde ruedan las bolas, de nuevo a velocidades más altas el valor de la vibración aumentará. Por lo tanto, el valor de la velocidad siempre debe almacenarse con el valor de la medición en tales máquinas. O podemos medirlos con una sonda tacométrica y el analizador almacenará la velocidad con el valor de la medición, o podemos introducir la velocidad manualmente antes de la medición, o podemos añadir la velocidad en el ordenador más tarde.

Diagnóstico potente incluso con un medidor de vibraciones simple



Incluso con un instrumento sencillo se pueden realizar diagnósticos muy fiables. Un ejemplo de tal instrumento es el Adash 4900 Vibrio.

Puede medir más que solo valores globales, pero no hablaremos de características avanzadas ahora. La medición básica es una medición de velocidad en la banda de 10-1000 Hz. El método de evaluación es RMS, por lo que, si queremos escribir un valor en un informe, por ejemplo, escribimos $4.8 \text{ mm/s}_{\text{RMS}}$ 10-1000 Hz. La segunda medición es la medición de aceleración en la banda de 500-16000 Hz. El método es nuevamente RMS. Por lo tanto, escribiremos, por ejemplo, $1.7 \text{ g}_{\text{RMS}}$ 0.5-16 kHz.

Comenzamos con la medición de aceleración. El uso más común es medir la condición del rodamiento. Valores bajos de hasta aproximadamente $0.3 \text{ g}_{\text{RMS}}$ siempre significan una condición excelente. Estamos hablando de tipos de rodamientos estándar que operan a 600-3600 RPM.

Para velocidades más bajas, incluso un valor de $0.3 \text{ g}_{\text{RMS}}$ puede indicar desgaste. Por otro lado, para velocidades más altas, el valor puede alcanzar valores aún más altos, aunque la condición del rodamiento sea buena.

El uso de los valores de velocidad de vibración es un poco más complicado. Estamos buscando los fallos mecánicos que ya se describieron, como desequilibrio, holgura y desalineación.

Si ya hemos medido valores más altos, ya sea según el estándar o según nuestra experiencia, podemos usar los siguientes criterios:

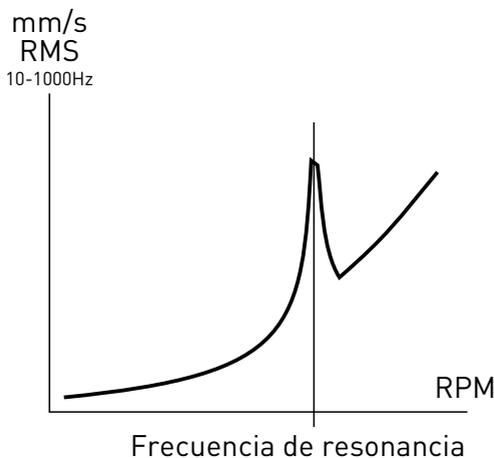
- Detección de desalineación. Si las vibraciones en la dirección axial son más altas que en las direcciones radiales, entonces la desalineación es el fallo más probable. En ese caso, deberíamos alinear la máquina y volver a medir.

- b) Detección de holgura. Si la condición a) no se aplica, entonces medimos las vibraciones en todos los pernos de montaje de la máquina. Si hay un valor de vibración más alto en un perno que en los otros, entonces hay una holgura. Puede tratarse de solo un perno suelto o el perno ya puede estar incluso dañado. Medimos de nuevo después de la reparación. No necesitamos tener bases de medición en los pernos para esta medición. Es solo una comparación de los valores. Solo colocar un imán junto al pie de la máquina es suficiente.
- c) Detección de desequilibrio. Si no se cumplen las condiciones (a) ni (b), lo más probable es que se trate de un desequilibrio. De nuevo, después de balancear, mida los valores de nuevo.

Puede haber situaciones en las que la vibración permanezca alta después de la reparación o el ajuste. Entonces hay problemas que aún no se han mencionado, como la resonancia o el desequilibrio eléctrico.

¿Qué es la resonancia?

Muchos de ustedes conocen el concepto de velocidad crítica. Este concepto es especialmente importante en máquinas grandes y ligeras como una turbina. Pero el problema también ocurre en máquinas ordinarias. Imaginemos que aumentamos la velocidad de la máquina y al mismo tiempo medimos el valor de la velocidad de vibración en la banda de 10-1000 Hz. Es normal que a medida que aumenta la velocidad, el valor de la vibración aumente gradualmente. Sin embargo, puede haber una situación en la que el valor de la vibración aumente rápidamente en una gran cantidad. Por ejemplo, un cambio relativamente pequeño en la velocidad de 1300 RPM a 1400 RPM hará que la amplitud de la vibración se duplique. Esto ya no es normal. Si aumentamos aún más las RPM, la vibración vuelve a caer. Es una paradoja inesperada. La curva de vibración se muestra en la imagen.

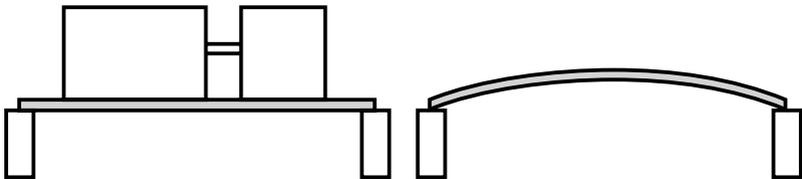


La velocidad está en el eje X y el valor de vibración en el eje Y. La frecuencia donde aparece el pico se le llama frecuencia de resonancia. Esta es una característica mecánica de la máquina. A la velocidad de resonancia, la fuerza centrífuga del desequilibrio de repente genera un valor de vibración mucho más alto. Esta velocidad se llama velocidad crítica, y la máquina no debe operarse a este valor de velocidad bajo ninguna circunstancia. Sin embargo, lo que nos concierne en la práctica, no es la frecuencia de resonancia de la máquina en sí. El fabricante de la máquina presta atención a esto y la primera velocidad crítica debe ser más alta que la velocidad de operación utilizada. Por ejemplo, esto no es válido para turbinas.

Entonces, la máquina en sí está bien. ¿Qué puede causar un problema de resonancia?

La respuesta es simple. Un mal diseño del bastidor de montaje puede ser la causa. Si la máquina se monta directamente sobre una base de hormigón pesado, entonces la resonancia no es un problema. Pero si la máquina se monta en un bastidor de acero que se apoya solo en bloques de hormigón en cada extremo, la resonancia puede ocurrir fácilmente. El bastidor puede estar mal diseñado ya que es demasiado flexible y el problema aparecerá.

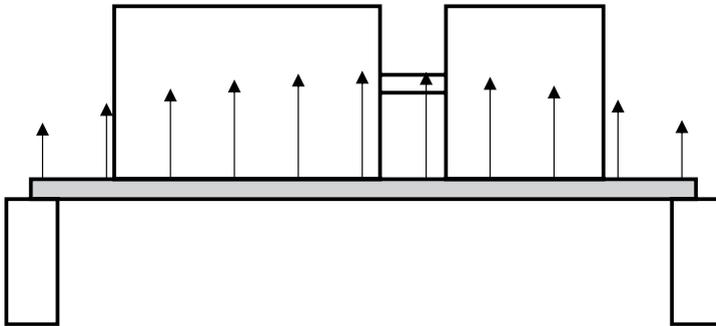
Cada bastidor tiene sus propias frecuencias de resonancia y generalmente nos interesa la primera, es decir, la más baja. Si la velocidad está cerca de esa primera resonancia, el bastidor se deforma como en la siguiente imagen. Es lo mismo que la cuerda de una guitarra que vibra en su primera frecuencia de resonancia. Incluso puedes ver con el ojo cómo se deforma la cuerda.



Podemos detectar el problema de diferentes maneras cuando usamos la medición:

- Si la velocidad de la máquina se puede cambiar (se utiliza un variador de frecuencia), entonces comenzamos a baja velocidad y la aumentamos gradualmente. Al mismo tiempo, medimos la velocidad de vibración en mm/s_{RMS} 10-1000 Hz. Si la vibración aumenta repentinamente a una cierta velocidad y luego vuelve a caer, el problema es la resonancia del bastidor a esa frecuencia = velocidad.
- Si la velocidad no se puede cambiar, entonces hacemos funcionar la máquina a la velocidad de operación. Iniciamos la medición continua. Las vibraciones son altas. Apagamos la energía y observamos los valores de vibración durante la parada. Si hay una disminución súbita y significativa, se sospecha que la velocidad de operación está cerca de la frecuencia de resonancia.
- Si la velocidad no se puede cambiar, entonces hacemos funcionar la máquina a la velocidad de operación y tomamos medidas en varios puntos del bastidor.

Dibujamos los valores medidos en la imagen.



Si hay deformación del bastidor a la frecuencia de resonancia, los valores deberían verse como en la imagen de arriba. Valores bajos en los bordes donde están los soportes y más altos en el centro.

Necesita cambiar el bastidor o cambiar su montaje para solucionar este problema. Añadir otro soporte en el medio siempre ayudará.

Desequilibrio eléctrico

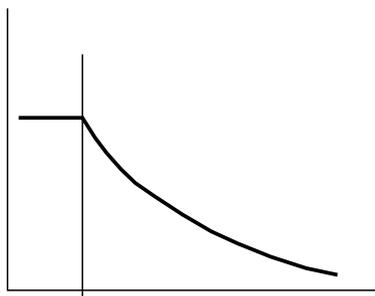
En el caso de los motores eléctricos, puede haber una situación en la que el bobinado eléctrico no esté en buenas condiciones. Puede haber interrupción o cortocircuitos en varios lugares. Entonces, las fuerzas electromagnéticas no están equilibradas y mueven el rotor lejos del centro de masa, es decir, de la posición donde debería estar correctamente ubicado. Parece un desequilibrio. Pero reequilibrar el rotor no aporta ninguna mejora importante.

Este fallo puede detectarse con una prueba sencilla. Colocamos un sensor en el motor e iniciamos una medición continua de la velocidad de vibración RMS en la banda de 10-1000 Hz. Esto significa que vemos un nuevo valor de medición en la pantalla aproximadamente cada segundo. Ahora apagamos la energía del motor. Comenzará a reducir la velocidad y se detendrá después de un tiempo. Pueden ocurrir dos situaciones:

- Quando se desconecta la alimentación, la vibración disminuye lentamente hasta que el motor se detiene.
- La vibración aumenta durante un momento muy corto después de desconectar la alimentación y luego cae inmediatamente a casi cero.

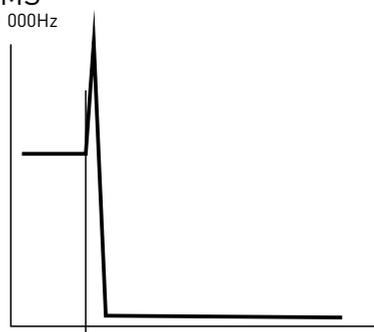
Podemos ver los ejemplos descritos en las imágenes de la página siguiente.

mm/s
RMS
10-1 000Hz



apagado

mm/s
RMS
10-1 000Hz



apagado

A la izquierda, hay un caso de disminución lenta de la vibración, lo que significa que el rotor está realmente desbalanceado. Por lo tanto, hay un punto pesado.

A la derecha, hay un caso de caída repentina. Esto significa que todo el problema de vibración está relacionado con el fallo de los devanados eléctricos del estator y el rotor.

Los más curiosos entre ustedes se preguntarán ahora qué significa el pico en el segundo caso. La respuesta es simple. Cuando se cortó la energía, las fuerzas electromagnéticas desaparecieron. Ellas desviaban el rotor de su posición correcta en el centro de masa. Así, se produjo un choque mecánico cuando el rotor volvió al centro de masa. Esto causó un aumento en la vibración. Los siguientes valores son muy bajos porque el rotor no está desbalanceado mecánicamente.

Realización de medidas en la práctica.

En primer lugar, necesitamos crear una estructura de la fábrica. Esto significa crear una lista de máquinas que mediremos. Luego creamos una lista de puntos de medición para cada máquina. Para estas listas utilizamos programas que compramos junto con los instrumentos de medición. Por ejemplo, Adash ofrece el programa DDS.



Creamos toda la estructura de la empresa en ese programa. Podemos crear varios niveles como Nave 1, Sección 3, y una lista de máquinas. Luego creamos puntos de medición en cada máquina y las medidas requeridas en ellos. Luego transferimos esta lista al analizador y podemos comenzar a medir. Cuando estamos en el campo, solo seleccionamos de la lista qué máquina y qué punto mediremos.

No tenemos que configurar nada en el campo. Todo en el analizador se configura automáticamente de acuerdo con la definición de la medición creada en el programa del ordenador con antelación.

La lista transferida se llama ruta. Determina a dónde iremos y qué mediremos.

Cuando volvemos de la ruta, transferimos todas las medidas al ordenador y podemos empezar a evaluarlas.

El programa DDS contiene muchas herramientas para automatizar, acelerar y simplificar la evaluación.

¿Con qué frecuencia debemos hacer la ruta? Probablemente el tiempo óptimo es de dos semanas. Si nuestra empresa es grande, puede ser a intervalos más largos. El intervalo máximo que no debe superarse es de 2 meses.

¿Qué hay que tener en cuenta? No podemos cometer muchos errores cuando vamos a una ruta. Hemos definido los parámetros con antelación en el ordenador. El único peligro real es que midamos en el punto de medición equivocado o incluso en la máquina equivocada. Los datos se almacenarán entonces en el ordenador en el lugar equivocado. Nos confundiremos durante la evaluación de los datos, al ver cómo los nuevos datos son tan diferentes de la medición anterior.

Informes de medida

Nuestra evaluación termina con la creación de un informe para el departamento de mantenimiento con las acciones que deben tomar. Siempre debemos tener en cuenta que el personal de mantenimiento no entiende muy bien los conceptos de diagnóstico de vibraciones. Por lo tanto, ni siquiera los molestemos con eso. Debemos usar un vocabulario que ellos entiendan. Mantenemos los informes lo más breves posible. No es necesario incluir una larga lista de máquinas que están en buenas condiciones. Solo se deben incluir en el informe las máquinas que necesitan un ajuste o reparación. El personal de mantenimiento prefiere un informe con solo una breve declaración: TODO ESTÁ BIEN.

Organización y evaluación de las medidas

Es ideal si una empresa compra sus propios equipos de diagnóstico de vibraciones y que sus propios empleados realicen las medidas y la evaluación. Esto se debe a que están en constante contacto con la maquinaria y obtienen información del mantenimiento sobre qué reparaciones o incluso reemplazos se han realizado.

También es posible comprar los diagnósticos de vibraciones externamente como servicio. Esta solución tiene varias desventajas. El personal externo solo viene en intervalos de tiempo definidos a medir la ruta. Por lo general, no saben nada sobre las intervenciones de mantenimiento entre sus rutas. Su enfoque es bastante diferente. Miden en muchas empresas como la suya. No tiene equipo para tomar medidas usted mismo si es necesario. Podría ser demasiado tarde para esperar a la próxima visita de un analista externo. Pero si decide ir con una empresa externa, entonces hacemos algunas recomendaciones.

Si una empresa externa viene a usted con una oferta de medidas, llévelos siempre a la máquina. Déjelos tomar las medidas y dar su opinión sobre los resultados. No pierda su tiempo con una persona que pone la excusa de que solo está haciendo la oferta y otros realizan las medidas. Siempre es positivo cuando la persona que ofrece la medición ya viene vestida con ropa de trabajo. Nunca se deje engañar por la afirmación de que todo el asunto del diagnóstico de vibraciones es muy complicado y no puede ser entendido por el cliente.

También hay soluciones en las que usted mismo mide las rutas y envía los datos solo para su evaluación. Siempre se le dice que un equipo de expertos está disponible para evaluar los datos. La pregunta es cuántos de ellos han estado alguna vez en la fábrica. Escuché un buen comentario de un diagnosticador con años de experiencia comentó una vez: „No aceptaría una recomendación para una reparación de un tipo al que nunca he visto. Y que, además, nunca ha visto mi máquina“. Esa es una definición exacta de cómo debemos abordar estos servicios. Nunca podrá incluir en un contrato con una empresa externa su responsabilidad financiera por no detectar un fallo o informar de un fallo que no existe.

¿Y qué hay de la inteligencia artificial? En Adash, hemos intentado usar la IA en varias ocasiones. La primera vez fue alrededor del año 2000. Puedo decir con certeza

que no será aplicable en el diagnóstico de vibraciones. La razón es sencilla: nunca habrá un conjunto de entrenamiento que contenga suficientes resultados de medición para la enorme variedad de máquinas.

Si lo comparo con la medicina, ¿cómo podría funcionar una inteligencia artificial si debiera diagnosticar enfermedades no solo para humanos sino también para animales? Porque los humanos son solo un tipo de organismo, por lo tanto, un tipo de máquina. Y hay una gran cantidad de tipos de máquinas en la práctica del diagnóstico.

Por lo tanto, manténgase siempre escéptico y no tema hacer muchas preguntas cuando evalúe ofertas potenciales para diagnósticos externos.

Calibración

Hoy en día, es principalmente un requisito burocrático para los diversos sistemas de calidad y sus auditorías. En los instrumentos modernos no hay elementos de ajuste para modificar los valores medidos en el laboratorio de calibración según el estándar.

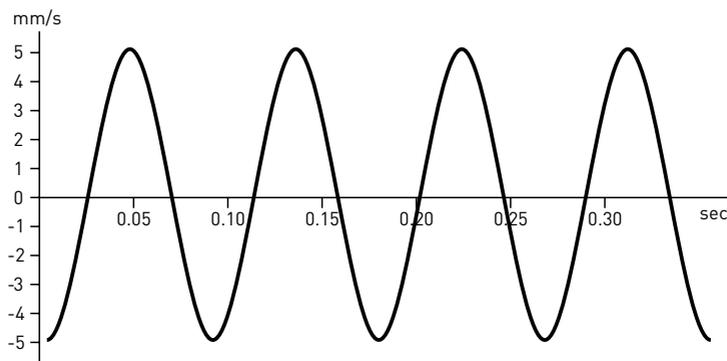
Si tenemos solo un instrumento y queremos verificar que está midiendo correctamente, entonces un laboratorio de calibración tiene sentido. Sin embargo, también hay instrumentos electrónicos que simulan un sensor. Generan valores de voltaje exactos. Los conectamos al instrumento y verificamos si el instrumento muestra el valor correcto.



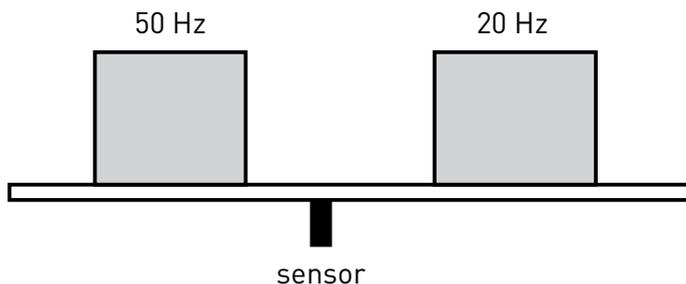
Si tenemos más de un instrumento y más de un sensor, podemos intercambiarlos durante las comprobaciones. Si algo está mal, podemos averiguar fácilmente qué es. Podría ser un sensor, un cable o un instrumento.

Forma de onda y espectro

Ya hemos hablado en detalle de la señal de tiempo. En ella observamos las vibraciones a lo largo del tiempo. Por lo tanto, el eje X corresponde al tiempo.



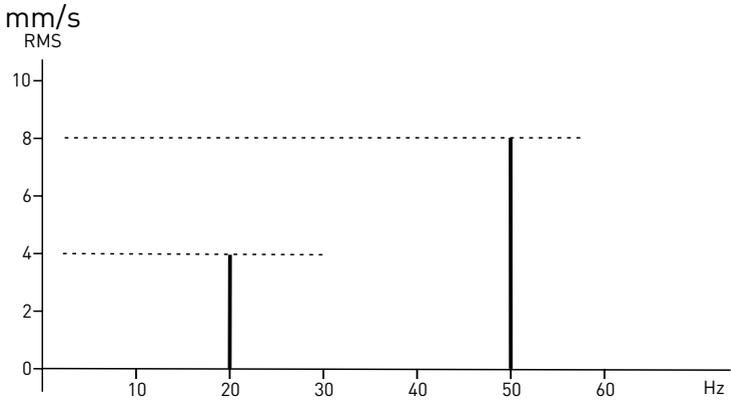
Podemos ver las vibraciones de otra manera. La segunda forma es calcular el espectro de frecuencia. El eje X del espectro no es el tiempo, sino la frecuencia. El espectro en sí nos muestra a qué frecuencias las vibraciones están emitiendo energía, por ejemplo, a qué frecuencias son las vibraciones y cuán fuertes son, y a qué frecuencias son insignificantes.



Por ejemplo, dos motores eléctricos están montados en un bastidor común. La velocidad del primero es de 3000 RPM (50 Hz) y la velocidad del segundo es de 1200 RPM (20 Hz). Colocamos un sensor en el bastidor debajo de los motores y medimos el valor de vibración RMS en la banda de 10-1000 Hz. Hacemos funcionar solo el primer motor. El valor medido es de 8 mm/s_{RMS}. Ahora detenemos el primer motor y hacemos funcionar el segundo. Ahora medimos un valor de 4 mm/s_{RMS}. Ahora hacemos funcionar ambos motores juntos. Medimos el valor de vibración, que es de casi 9 mm/s_{RMS} (exactamente 8.94 mm/s_{RMS}).

Si solo conocemos este valor de 9 mm/s_{RMS}, no podemos dividirlo en dos componentes correspondientes a los motores individuales funcionando por separado.

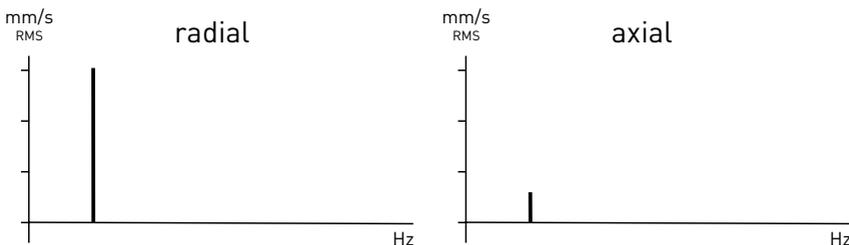
Por lo tanto, no sabemos cuáles son las condiciones de los motores individuales. Sin embargo, si convertimos la señal de tiempo en un espectro, podemos distinguir los componentes individuales.



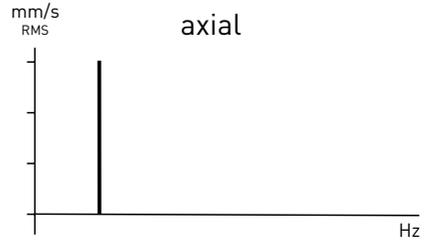
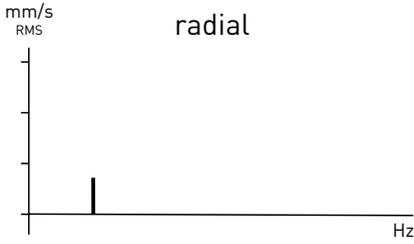
Podemos ver dos líneas espectrales a 50 Hz y 20 Hz. La amplitud a 50 Hz es de 8 mm/s y la amplitud a 20 Hz es de 4 mm/s. El espectro nos da así una nueva visión del contenido de vibración que la señal de tiempo no nos permitió ver.

Los diferentes fallos en las máquinas difieren entre sí, específicamente en la imagen de frecuencia. El espectro se convierte así en una herramienta poderosa en el análisis de vibraciones. En la evaluación buscamos valores altos, es decir, líneas espectrales altas, y buscamos el fallo que las provoca.

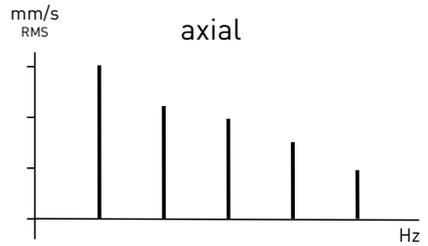
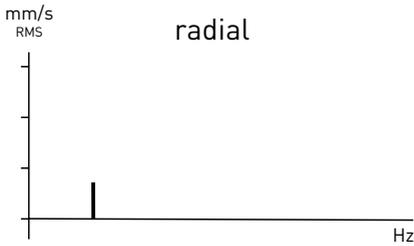
Usando algunos ejemplos, mostraremos lo fácil que es distinguir los fallos mecánicos si tenemos un espectro disponible.



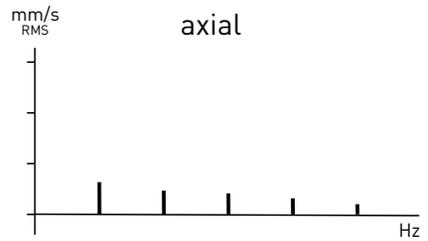
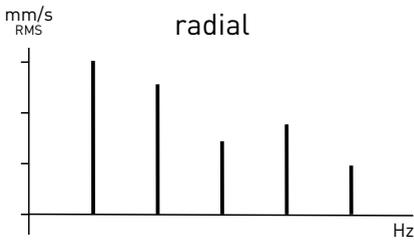
La alta amplitud está solo en la línea de velocidad. Si es más alta en la dirección radial que en la dirección axial, entonces es un desequilibrio.



Si la línea de velocidad es más alta en la dirección axial, entonces se trata de una desalineación.



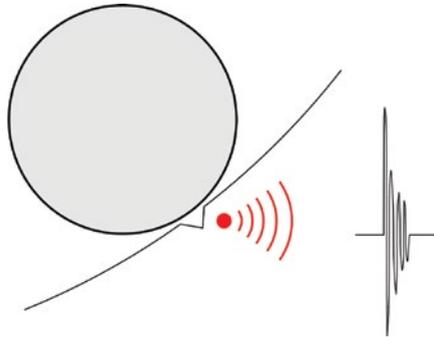
Si también hay líneas a múltiplos de velocidad (estas se denominan armónicos), entonces hay una desalineación significativa. Seguimos hablando del caso en el que la vibración axial es mayor que la vibración radial.



Si hay componentes armónicos y la vibración es más fuerte en la dirección radial, entonces se trata de holgura.

Diagnóstico avanzado de rodamientos mediante demodulación (análisis de envolvente)

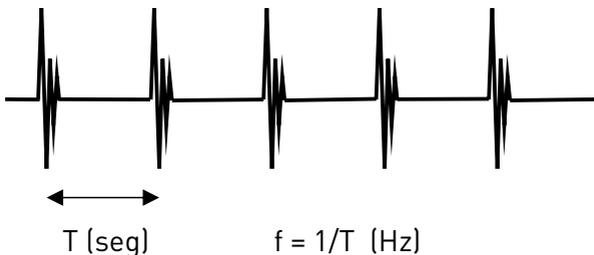
¿Qué es el desgaste de los rodamientos? Es el desgaste de las pistas sobre las que ruedan las bolas o los rodillos, así como el desgaste de la superficie de las bolas o los rodillos mismos. Este desgaste se llama picadura.



¿Qué sucede cuando la bola golpea un fallo (agujero) en la pista del rodamiento?

Habrá un choque. Es como golpear un rodamiento con un martillo. A medida que una bola tras otra golpea el agujero, se genera una señal de tiempo que contiene choques individuales.

Si conocemos la velocidad y las dimensiones del rodamiento, podemos calcular a qué intervalo estarán los choques. Es decir, cada cuánto ocurren en el tiempo. Y ahora viene la magia. Si aparece un agujero en el anillo exterior, el anillo interior, en la bola o si la jaula está agrietada, el intervalo de tiempo entre los choques es diferente. Significa que podemos distinguirlos.



Si los choques llegan a un intervalo de tiempo regular, podemos calcular la frecuencia. Es decir, cuántas veces llega un choque por segundo.

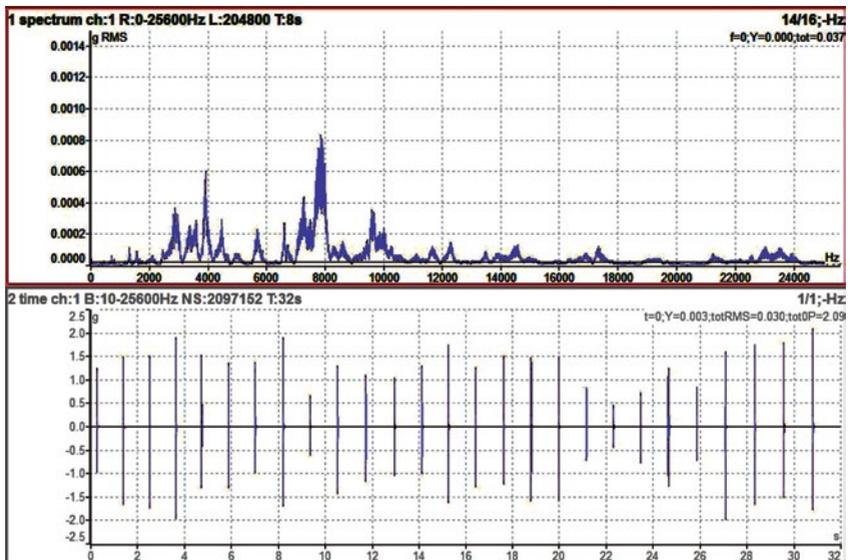
Y como el intervalo de tiempo varía para diferentes defectos, también lo hace la frecuencia. Estas frecuencias se llaman frecuencias de fallo de rodamiento. Y el espectro nos permite buscarlas.

Hay cuatro frecuencias de fallo:

- BPF0 Frecuencia de Paso de Bola, Anillo Exterior (Ball Pass Frequency Outer)
- BPFI Frecuencia de Paso de Bola, Anillo Interior (Ball Pass Frequency Inner)
- BSF Frecuencia de Giro de Bola (Ball Spin Frequency)
- FTF Frecuencia Fundamental del Tren (Fundamental Train Frequency)

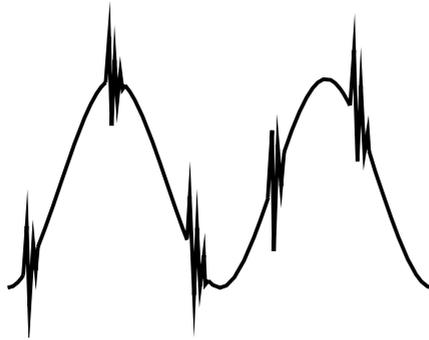
Las frecuencias de los choques son altas. Por lo tanto, la señal de aceleración siempre debe medirse. Mide bien las altas frecuencias.

Pero la situación no es tan simple. Podemos calcular el espectro directamente a partir de una señal de tiempo con choques. Pero no hay amplitudes visibles en las frecuencias de fallo. Aunque hay picos significativos en la señal de tiempo (2 g), el valor de pico en el espectro es de $0.0008 \text{ g}_{\text{RMS}}$.



La razón es la siguiente. La altura de las líneas en el espectro corresponde a los valores RMS. Y esto corresponde a la energía contenida en la señal. Recuerde la explicación del valor RMS y las áreas rellenas. El espectro solo responde bien a áreas significativas en la señal. No responde bien a valores de pico altos sin un área significativa bajo la señal.

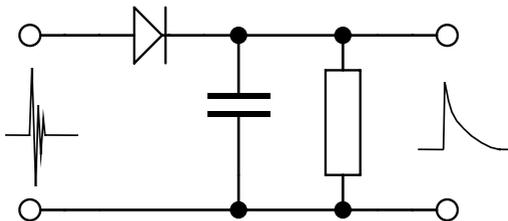
Así que ahora sabemos por qué no podemos calcular directamente el espectro de la señal medida. Tenemos que hacer algo con ella primero. Tenemos que añadir algunas áreas significativas. El primer paso es filtrar las bajas frecuencias.



Ya hemos descrito esta situación una vez. Tenemos choques, pero también tenemos una forma de onda sinusoidal en la frecuencia de la velocidad. No queremos eso en la señal. Por eso primero filtramos todo por debajo de 500 Hz.



Ahora pasaremos la señal al modulador de envolvente. Esto añadirá un área significativa a la señal.

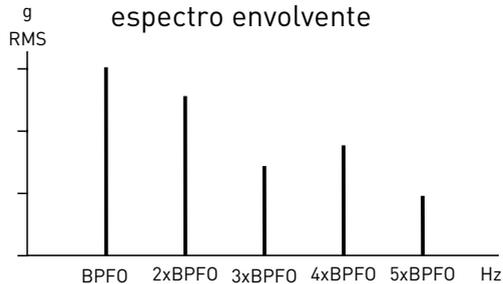


Los choques individuales se transforman mediante un diodo (que solo deja pasar voltaje positivo), luego carga el condensador C y luego se descarga lentamente a través de la resistencia R. Esto produce una señal en la salida similar a las envolventes de los choques.



El cálculo del espectro responde mucho mejor a esta señal y podemos ver picos significativos.

Si el defecto está solo en el anillo exterior, podemos observar en el espectro su frecuencia (BPFO), seguida de sus componentes armónicos.



Ahora explicaré por qué hay armónicos en la señal. Si calculamos un espectro a partir de una señal donde solo hay una onda sinusoidal en la frecuencia f , entonces (dadas ciertas otras condiciones) solo habrá una línea distinta a la frecuencia f en el espectro.

Sin embargo, si la señal de tiempo es, por ejemplo, rectangular, entonces el espectro contendrá una frecuencia f y muchos armónicos. Y esto es cierto para todas las formas de señal que no son sinusoidales. El espectro siempre responde a la distorsión de la señal mostrando componentes armónicos. Y una señal de envolvente es una señal altamente distorsionada. Está lejos de ser sinusoidal.

La ventaja de la demodulación es que podemos detectar un fallo en el rodamiento en una etapa muy temprana. Otra ventaja de conocer las frecuencias de fallo es que no nos confundimos con otras frecuencias. Pueden estar en el espectro y no tener nada que ver con el fallo del rodamiento (por ejemplo, choques causados por el desgaste de los dientes de un engranaje).

Ahora describimos un malentendido común del proceso de demodulación. Las frecuencias de fallo de los rodamientos pueden ser muy bajas. El usuario pregunta si debe usar un sensor que pueda medir frecuencias tan bajas. En realidad, es todo lo contrario. Las líneas de defecto en el espectro se crean por cálculo, no por medición. ¡Necesitamos tener choques en la medición y luego convertir el intervalo de tiempo entre los choques en frecuencia! ¡No se mide nada en las frecuencias de fallo! Si tuviéramos un acelerómetro que mide desde 500 Hz hacia arriba, entonces podríamos usarlo. Después de todo, eliminamos todas las frecuencias por debajo de 500 Hz antes de la modulación de envolvente de todos modos.

Las frecuencias de fallo nos permiten lidiar con situaciones en las que tenemos dos rodamientos diferentes uno al lado del otro. Podemos ver claramente en el espectro cuál está dañado y necesita reemplazarse.

Escuchar las vibraciones

Este es un método antiguo de evaluación de vibraciones. Se presionaba un destornillador con la punta hacia abajo sobre la máquina y la superficie trasera se presionaba contra la oreja.

Incluso hoy, nuestros instrumentos Adash nos permiten escuchar las vibraciones. La señal del sensor se introduce en los auriculares. Los rodamientos (su ruido o silbido) se pueden escuchar muy bien. Varios fenómenos repetitivos, varios golpes dentro de la máquina se pueden escuchar bien. Por supuesto, no se puede escuchar la señal de los fallos mecánicos. Es decir, no los oímos, nuestro oído no es sensible a frecuencias tan bajas y los auriculares las transmiten con gran atenuación.

Ultrasonido

El ultrasonido es una señal a frecuencias superiores a 25 kHz. Hay micrófonos especiales que pueden captar frecuencias tan altas. Son más sensibles a frecuencias de alrededor de 40 kHz. Se pueden usar para medir rodamientos, pero no ofrecen ninguna ventaja sobre las medidas frente a los sensores de aceleración. Son útiles para detectar fugas en la distribución de presión.

Los analizadores de vibraciones Adash también permiten esta medición.

Recálculos de los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento

Para realizar tal recálculo simplemente multiplicando por una constante, es necesario que la señal tenga una forma sinusoidal. Si no la tiene, el recálculo simplemente no se puede realizar. Matemáticamente, por supuesto, es posible, pero tenemos que saber cómo usar derivadas e integrales.

Entonces, tengamos una señal de aceleración con algún valor RMS o 0-P. Solo un recordatorio de que $0-P=RMS/0.71$. La frecuencia de la onda sinusoidal es f . Entonces los valores de velocidad son iguales a:

$$vel_{RMS} = \frac{acc_{RMS}}{2*\pi*f} \quad \text{y} \quad vel_{0-P} = \frac{acc_{0-P}}{2*\pi*f}$$

Luego, las siguientes fórmulas se aplican al desplazamiento:

$$disp_{RMS} = \frac{vel_{RMS}}{2*\pi*f} \quad \text{y} \quad disp_{0-P} = \frac{vel_{0-P}}{2*\pi*f}$$

Una vez más, tenga en cuenta la condición de la onda sinusoidal.

¿Por qué medimos las bajas frecuencias en desplazamiento y las altas frecuencias en aceleración?

La mejor manera de entender esto es a través de ejemplos. Considere dos máquinas que exhiben diferentes valores de vibración.

- A) La máquina opera a una velocidad muy baja de 300 RPM (5 Hz) y el valor RMS del desplazamiento es de 100 μm.
- B) El turbocompresor de alta velocidad opera a 120 000 RPM, que es 2 000 Hz y el valor RMS de la aceleración es de 1 g.

Si medimos la máquina A con un sensor de desplazamiento que tiene una sensibilidad de 8 mV/μm, para un valor de 100 μm obtenemos 800 mV. Una señal eléctrica con una amplitud de 800 mV es muy fácil de medir. Ahora intentemos medir la máquina A con un sensor de aceleración. Primero, calculemos qué valor de aceleración hay en la máquina A. De las fórmulas anteriores, podemos ver que:

$$acc_{RMS} = disp_{RMS} * [2 * \pi * f]^2$$

Rellenando los números:

$$acc_{RMS} = 100 \mu m * [2 * \pi * 5]^2 \doteq 100 \mu m * (31.4)^2 \doteq 100 \mu m * 900 = 90\,000 \mu m/s^2 = 90 \text{ mm/s}^2 = 0.09 \text{ m/s}^2 = 0.009 \text{ g RMS}$$

El valor de 0.009 g es difícil de medir. Con una sensibilidad del sensor de 100 mV/g, esto es un valor de 0.9 mV, que ya puede estar oculto en el ruido.

Si medimos la máquina B con un sensor de aceleración que tiene una sensibilidad de 100 mV/g, para un valor de 1 g obtenemos 100 mV, lo cual es fácil de medir.

¿Qué pasa si intentamos medir la máquina B con un sensor de desplazamiento? La fórmula es:

$$disp_{RMS} = acc_{RMS} / [2 * \pi * f]^2$$

Rellenando los números:

$$disp_{RMS} = 1 \text{ g} / [2 * \pi * 2\,000]^2 \doteq 10 \text{ m/s}^2 / [12\,000]^2 = 10 \text{ m/s}^2 / 144\,000\,000 = 6.9 * 10^{-8} \text{ m} = 6.9 * 0.000\,000\,01 = 0.000\,000\,069 \text{ m} = 0.000\,069 \text{ mm} = 0.069 \mu m.$$

Con una sensibilidad del sensor de 8 mV/μm obtendríamos 0.5 mV, que es muy bajo y ya puede estar cubierto por el ruido. Por lo tanto, medir la máquina B con un sensor de desplazamiento tampoco sería una buena idea.

De manera similar, calcule qué valor de desplazamiento tendría que haber a 1 Hz cuando el valor de aceleración es de 3 g. Si obtuvo un valor RMS de 0.76 m, entonces calculó correctamente. El RMS de 0.76 m es aproximadamente 1 m_{0-p}. Significa que la máquina vibraría +/- 1 m alrededor de la posición central. Solo quería mostrar que valores de aceleración más altos a bajas frecuencias son imposibles, porque tendría que haber valores de desplazamiento enormes. Del mismo modo, valores de desplazamiento más altos a altas frecuencias son imposibles porque tendría que haber valores de aceleración enormes.

Medidas en línea

Hasta ahora, solo hemos hablado de medidas con un analizador de vibraciones portátil. Pero también hay instrumentos que realizan medidas continuas. Esto significa que los sensores se montan en la máquina y la condición de la máquina se monitorea continuamente. Tiene la ventaja de que puede monitorear la condición continuamente y detectar un problema de inmediato. La medición continua significa que, por ejemplo, medimos un nuevo valor de vibración cada segundo. En el método de medición de ruta, obtenemos un nuevo valor, por ejemplo, una vez cada dos semanas.

Por supuesto, hay que pagar por esta ventaja. Los precios de los sistemas en línea son más altos que los precios de los sistemas portátiles. Mientras que un analizador portátil es suficiente para las rutas, necesitamos un sistema en línea para cada máquina.

Hay dos hechos básicos que recordar al configurar un sistema en línea:

- 1) El rendimiento del procesador no es infinito
- 2) La capacidad del disco para almacenar datos no es infinita

Aunque ambas afirmaciones son claras y nadie las cuestiona, se sorprendería de cuántos usuarios las olvidan al configurar su sistema en línea. No calculan cuánto espacio en disco usan en un día, por ejemplo.



Sistemas online Adash A3716



Sistemas online Adash A3800

En el pasado, los sistemas no medían de forma completamente continua. El usuario establecía con qué frecuencia debía medirse el muestreo, por ejemplo, cada 10 minutos.

Los sistemas actuales de Adash sí miden de forma continua. Durante el proceso de desarrollo, también pusimos mucho esfuerzo en desarrollar algoritmos para manejar grandes volúmenes de datos.

La idea básica es esta: no tiene sentido guardar valores de medición que no cambian. Si el valor es igual a 3 mm/s, entonces es suficiente almacenarlo, por ejemplo, una vez cada hora o incluso más horas. Por supuesto, cuando miras los gráficos, sabes que un hueco de 3 horas entre medidas no significa que se tomó una medición una vez cada 3 horas. Sabes que se midió todo el tiempo y que el valor fue estable. Los algoritmos de almacenamiento de Adash utilizan este enfoque para todos los tipos de medidas. El usuario no debe perder ningún dato que signifique un cambio en la condición de una máquina.

La reducción de datos también significa un acceso más rápido a la base de datos y una visualización más ágil de las tendencias.

Equilibrado

La medición de vibraciones también permite realizar con facilidad el equilibrado de rotadores. No entraremos en demasiados detalles. En la práctica, los rotores con uno o dos planos de equilibrado se equilibran operacionalmente. El equilibrado en un solo plano se realiza en rotores estrechos donde el radio es significativamente mayor que el ancho. El equilibrado en dos planos se realiza en rotores que son más anchos. Vemos el equilibrado en dos planos en la práctica en el equilibrado de ruedas de coche. Se pone un peso en el interior y otro en el exterior.

Describimos el caso de un plano, que es más simple. Conectamos un sensor al rodamiento del rotor y una sonda tacométrica para medir la velocidad. La sonda tacométrica es importante porque solo mediremos la amplitud y la fase en la frecuencia de la velocidad. En los instrumentos Adash, esta medición se llama medición de amp+fase. Hacemos girar el rotor a la velocidad de operación y medimos los valores iniciales. Luego montamos una masa de prueba en el rotor. Se recomienda que su peso sea aproximadamente cinco veces el valor del desequilibrio residual admisible (cada rotor está siempre un poco desbalanceado, el término desequilibrio residual admisible significa el valor en el que no tenemos que equilibrar y podemos operar la máquina sin limitaciones). Luego hacemos girar el rotor de nuevo y medimos la amplitud y los valores de fase de la prueba. Ahora el analizador calcula qué tan pesada es la masa necesaria y dónde debe colocarse. La posición de la masa de equilibrado se lee desde la marca reflectante en el eje, que es utilizada por la sonda tacométrica. Está en grados y el círculo completo del rotor es de 360°.

El equilibrado en dos planos es similar, pero se toman más medidas. Los pesos de prueba deben colocarse sucesivamente en el primer y luego en el segundo plano. Los resultados son dos pesos y dos posiciones. Uno para cada plano.

Es una buena idea probar primero el proceso de equilibrado en la oficina, por ejemplo, en un ventilador de escritorio. El desequilibrio puede simular, por ejemplo, con plastilina. El peso final de equilibrado debe tener el mismo peso y posición opuesta a la plastilina de simulación.

Para el equilibrado, se utiliza el estándar ISO 1940, que describe tanto los procedimientos como el desequilibrio residual admisible recomendado para diferentes tipos de máquinas y diferentes valores de velocidad.

Configuración de los parámetros básicos de medición

Ajustes del sensor

ICP on/off – La mayoría de los sensores contienen electrónica interna que requiere una fuente de alimentación, que se llama ICP® (Marca Registrada de PCB). Si el sensor no requiere alimentación y dejamos la alimentación ICP encendida, podemos dañar el sensor. Si estamos conectando un generador de señales a la entrada del analizador, siempre deje el ICP apagado.

Unidades – Un sensor es un dispositivo que convierte una cantidad física en un voltaje o corriente. Un voltaje está en la salida del sensor de vibración y tenemos que establecer qué cantidad física convierte al voltaje. La mayoría de las veces tenemos sensores de aceleración, por lo que establecemos g o m/s^2 .

Sensibilidad – Aquí establecemos el factor de conversión entre la unidad y el voltaje de salida, para g suele ser de $100mV/g$. Es decir, si el valor de la señal es $1 g$, entonces $100mV$ están en la salida del sensor.

Ajustes de la medición global

Canal – El número de canal en el que queremos realizar la medición.

Unidades – La unidad física en la que queremos realizar la medición. Precaución: no confundir con la unidad del sensor, que es, por ejemplo, g , el instrumento puede convertir la señal en mm/s o μm . Así, para medir la condición del rodamiento elegimos g , para medir fallos mecánicos elegimos mm/s .

Detectar tipo – Elección del método de evaluación. La mayoría de las veces elegimos RMS, otros se utilizan solo en casos especiales.

Banda: Fmin, Fmax – Aquí establecemos las frecuencias del filtro pasa banda. Elimina todas las frecuencias más bajas que F_{min} y todas las frecuencias más altas que F_{max} de la señal de entrada. Luego se evalúa el valor, por ejemplo, RMS. Depende de qué fallos nos interesen. Para medidas de condición de rodamientos, elegimos altas frecuencias, por ejemplo, $5-25.6 kHz$. Para rodamientos de funcionamiento lento, elegimos una F_{min} más baja, por ejemplo, $500 Hz$. Para la medición de fallos mecánicos, generalmente elegimos $10-1000 Hz$, para máquinas de

funcionamiento lento (velocidades por debajo de 600 RPM, es decir, por debajo de 10 Hz) elegimos F_{min} , por ejemplo, 1 Hz. Cuanto más bajo sea el valor, más tiempo esperará para la medición. El tiempo de espera es necesario para que el sensor se establezca después de que se ha conectado a la base de medición. Para un valor de 10 Hz, es de 1 segundo. Para un valor de 1 Hz, es de 10 segundos.

Muestras – Al establecer el número de muestras, establecemos cuánto tiempo queremos que dure la medición para calcular el resultado. Por lo general, una duración de 1 s es suficiente. La medición siempre debe incluir al menos 10 revoluciones del rotor.

Ajustes de la medición de la forma de onda

Hemos explicado la medición de la señal de tiempo utilizando el ejemplo de un resorte y una grabación de vibración. Los parámetros básicos Canal, Unidad, Banda F_{min} , Banda F_{max} , Muestras, ya se han explicado en la configuración de la medición global anterior.

Frecuencia muestreo – Este valor determina cómo se convertirá la señal analógica a digital. El analizador siempre establece la frecuencia de muestreo por sí mismo según el valor establecido de la Banda F_{max} . No recomendamos cambiar este valor hasta que tenga un conocimiento más profundo de la medición.

Ajustes de la medición del espectro

Ya hemos explicado que esta es la conversión de una señal de tiempo en un espectro. El cálculo se realiza mediante FFT (transformada rápida de Fourier). No necesitamos saber más sobre el cálculo.

Los parámetros Canal y Unidades ya se han explicado en la configuración anterior del valor de medición global.

Ventana – Mantenga la opción 'Hanning', la comprensión de la función de ventana requiere un conocimiento más profundo y no es necesaria para realizar diagnósticos.

Banda: F_{min} – Es solo la configuración de la banda F_{min} . Si no está interesado en frecuencias por debajo de 10 Hz, deje 10 Hz, de lo contrario, ingrese un valor más bajo. Un valor más bajo aumenta el tiempo de medición, como ya hemos explicado para la medición global.

Rango – Configuración del rango de frecuencia del espectro. Por lo general, 1000 Hz es suficiente para medidas de mm/s, cuando se mide en g queremos ver altas frecuencias, por lo que ingresamos, por ejemplo, 25600 Hz.

Líneas – Esta configuración es la misma que la resolución de la imagen. Una alta resolución nos permite hacer zoom en la imagen y ver los detalles. Cuando ampliamos una imagen de baja resolución, solo vemos rectángulos sin estructura interna. Es similar con el espectro, cuando tenemos dos frecuencias cercanas una de la otra. Si necesitamos separarlas, debemos elegir una resolución más alta para permitir esto. El valor df que se muestra debajo del número de líneas muestra la

diferencia de frecuencia entre las líneas vecinas. Si necesitamos resolver dos frecuencias que están, por ejemplo, a 2 Hz de distancia, entonces el df debe ser de al menos 0.5 Hz. Una resolución más alta siempre significa un tiempo de medición más largo. El tiempo de medición se calcula fácilmente sin una calculadora. Tomamos el valor de df (es decir, la distancia entre líneas) en Hz y calculamos $T=1/df$, T es el tiempo de medición. Por ejemplo, si establece el Rango y el Número de líneas de modo que $df=0.01\text{Hz}$, la medición tardará 100 segundos.

Promediado – Las vibraciones pueden no ser siempre completamente estables o pueden contener mucho ruido. Es una buena idea usar el promediado. Por ejemplo, si establecemos un valor de 8, se toman 8 medidas individuales. Se calcula un promedio aritmético de ellas y se guarda. El valor de promediado de 8 es suficiente en la mayoría de los casos.

Ajustes de la medición del espectro de demodulación

También puede encontrar el concepto de análisis de envolvente en la literatura. Es exactamente la misma medición.

Los parámetros **Canal, Ventana, Unidades, Promediado** ya se han explicado anteriormente. Los espectros de demodulación solo se pueden medir en aceleración, por lo que la elección de unidades es limitada.

Advertencia: como se explicó anteriormente en un capítulo aparte, no confunda el significado de Demod F_{min} , F_{max} y el significado de Rango.

Demod F_{min} , F_{max} – Las frecuencias del filtro de entrada, la tarea de este filtro en la demodulación es eliminar las frecuencias de la velocidad y los componentes armónicos. Solo los choques deben permanecer, porque solo estos son necesarios para la modulación de envolvente posterior.

Rango – Rango del espectro después de la aplicación de la envolvente. Aquí queremos ver las frecuencias de fallo de los rodamientos, estas suelen estar por debajo de 100 Hz. Por lo tanto, el rango es suficiente hasta unos pocos cientos de Hz.

Líneas – No es necesario tener muchas líneas. Las frecuencias de fallo están bastante separadas, por lo que no necesitamos una alta resolución. 1600 líneas es perfectamente suficiente.

¿Qué decir para concluir?

Si la medición es cuidadosa y fiable, podemos detectar fallos y averías de la máquina con antelación, lo que en última instancia significa ahorrar tiempo y dinero. Es una exageración decir que la medición se convertirá en su asistente indispensable.

Seguramente no se convertirá en un maestro después de su primera medición, pero creemos que sus habilidades mejorarán con el tiempo y pasará este manual a nuevos principiantes. 😊

Después de todo, sabemos de lo que estamos hablando. El mundo de las vibraciones es nuestro mundo. Además, no se quedará solo en esto. Encontrará muchos artículos, videos y más manuales sobre esto en nuestro sitio web.

VIDEOS



**Folletos
informativos
y manuales**



Sitio web



**Diagnóstico
de vibración**



ADASH spol. s r. o.

Hlubinská 32/1379

Ostrava, 702 00, República Checa

+420 596 232 670

info@adash.com

www.adash.com

1ª edición, 2025

© ADASH spol. s r. o.