Prácticas SKF para Celulosa y Papel
Segmento Global Celulosa y Papel SKF | N.º 19 | Diciembre 2016

¿Monitorear equipos de rotación lenta con análisis de vibración?

Quizás no lo sepa, pero SKF ha estado monitoreando rodamientos de todos los tamaños en numerosas aplicaciones diferentes en todo el mundo durante más de 30 años, y esto incluye equipos de rotación tan lenta como de una revolución por minuto (r. p. m.). Nos gusta pensar que esta experiencia, combinada con nuestro conocimiento de los rodamientos y su aplicación, nos otorga una perspectiva bastante única de la situación.

En el clima actual del mercado, es importante garantizar el funcionamiento confiable de todos los equipos en la industria papelera, mediante el uso de rodamientos grandes que giran a velocidades muy bajas en condiciones en que una falla inesperada puede causar 40 horas de parada.

Existe el concepto erróneo común de que no es posible monitorear eficazmente los rodamientos que giran a velocidades muy bajas con las técnicas de monitoreo de las vibraciones disponibles. De hecho, es bastante posible, siempre que se enfoque de la manera apropiada.

El resto de esta edición de Prácticas SKF para Celulosa y Papel estará dedicado exclusivamente al tema del monitoreo de rodamientos que giran a velocidad lenta. La detección y el diagnóstico exitosos de problemas en desarrollo tienen numerosas ventajas: evitar paradas no planificadas, identificar la causa raíz de un problema y eliminarla para siempre, detectar el daño en desarrollo en los rodamientos con la suficiente antelación como para que la refabricación sea una opción viable.

Atentamente,
Scott Morris
Gerente de industria global
Celulosa y papel
scott.morris@skf.com

Monitoreo de rodamientos de baja velocidad: Desafíos y soluciones

Hace un par de años, resurgió el interés en el monitoreo de rodamientos de baja velocidad como resultado de un mayor enfoque en equipos críticos (en especial, en las líneas de recuperación de celulosa y productos químicos) y actividades promocionales en el mercado. Escuché diversas opiniones, que iban desde considerar que sería muy fácil hacerlo hasta que no era posible en absoluto con monitoreo de vibraciones.

Al estar familiarizado con la larga historia de éxitos de SKF, que se remonta a comienzos de la década del noventa, con rodamientos que giran incluso a menos de una r. p. m., esto me sorprendió bastante. Me acerqué a expertos dentro de SKF como David McCall en los EE. UU. y Lars-Erik Heed en Suecia, y tuve la impresión de que, en muchos casos, las cuestiones se reducían a un malentendido o una aplicación indebida de la tecnología existente de SKF. Sin embargo, también había algunos pocos casos en los que las fallas en desarrollo parecían haber sido pasadas por alto, incluso si el sistema de monitoreo y las configuraciones parecían ser correctas. Creamos un grupo para analizar más de cerca la información disponible y descubrimos que a pesar de que, de hecho, había numerosos casos exitosos de detección de daños en los rodamientos a bajas velocidades, había una clase de aplicaciones que necesitaban entenderse mejor. En este sentido, decidimos concentrarnos en rodamientos que funcionaran a menos de 20 r. p. m. y en dos casos de aplicaciones diferentes: velocidad estable y no estable.

Monitoreo de rodamientos de baja velocidad

El funcionamiento confiable de las máquinas giratorias es una obligación en el entorno competitivo actual, y los rodamientos de elemento rodante son los componentes mecánicos más críticos en casi todos los activos giratorios en la producción de celulosa y papel. Miles de rodamientos de diversos tamaños y velocidades de giro operan en cualquier momento en una papelera, pero es un grupo relativamente pequeño el que soporta el impacto más económico: los rodamientos grandes de giro relativamente lento. El costo de estos rodamientos es comparativamente alto y suelen usarse en aplicaciones críticas para la producción, tales como: secadores, rodillos de prensa, rodillos de apoyo de hornos, prensas de lavado y cajas de engranajes.

Los eventos de paradas no planificadas en estas aplicaciones durarán varias horas o más, con potenciales costos resultantes de cientos de miles de dólares. Por lo tanto, es esencial hallar y diagnosticar con mucha antelación los problemas en desarrollo en estos rodamientos, para planificar y ejecutar medidas correctivas con efectos negativos mínimos sobre la producción.

La determinación de la condición de los rodamientos mediante el monitoreo de las vibraciones es eficaz y está bien consolidada. Los elementos de esta metodología incluyen:

- Sensores sísmicos (acelerómetros) montados en el soporte de rodamientos
- Sistema de adquisición de datos de vibración (sistema portátil o en línea) con la capacidad de recopilar y analizar datos dinámicos (por ejemplo, la transformada rápida de Fourier [Fast Fourier Transform, FFT] y el análisis de forma de onda de tiempo), con técnicas de extracción de funciones (tal como la envolvente de aceleración) que mejoran la detección y el diagnóstico
- Software para el almacenamiento y análisis de datos

Si bien los rodamientos de secadores de máquinas papeleras, rodillos de prensa y cajas de engranajes giran lentamente, las velocidades no son tan lentas como para representar alguna dificultad en particular para el uso de técnicas modernas. Esto se debe a que la energía de impacto aún es significativa a velocidades entre 80 y 300 r. p. m. Por este motivo, no las analizaremos con más detalle en este documento. Sin embargo, a muy bajas velocidades (p. ej., rodamientos grandes que funcionan a 20 r. p. m. o menos), suele ser difícil encontrar los daños temprano, o directamente encontrarlos, debido a la baja energía de impacto inherente y las fuentes de ruido próximas. Esto ha llevado al concepto erróneo común de que no es posible monitorear eficazmente los rodamientos a estas velocidades muy bajas usando las técnicas de vibraciones.

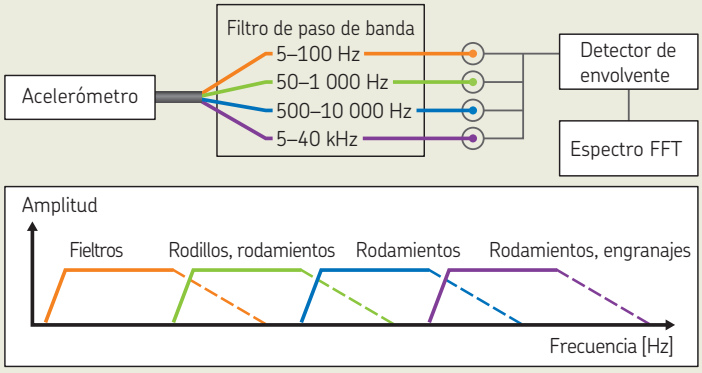


Fig. 1: Ejemplo de filtros de la envolvente de aceleración (método de SKF)

El análisis de los datos de campo ha demostrado que, en la mayoría de los casos, esto surge de uno o más errores comunes al configurar la medición de las vibraciones. Algunos errores comunes incluyen:

- Selección incorrecta del filtro de envolvente
- Uso de un sensor de baja frecuencia (acelerómetro)
- Método de montaje incorrecto
- No considerar los posibles cambios en las condiciones de carga
- Duración inadecuada del tiempo de medición
- No corregir la velocidad no estable

En el caso de las aplicaciones de muy baja velocidad, el uso de técnicas de alta frecuencia, tal como la envolvente de aceleración, ha demostrado ser exitoso, pero un problema común es la selección incorrecta del filtro de envolvente. La mayoría de los instrumentos comerciales, además de las mediciones de vibración estándar, tienen bandas de filtro de envolvente seleccionables, que se concentran en la extracción de función en un rango de frecuencia específico, tanto para minimizar el ruido como para recopilar señales de impactos (**→ fig. 1, página 2**). Un concepto erróneo común es considerar que los filtros adecuados para usar con rodamientos de baja velocidad son los de frecuencia más baja. En realidad, no es así, ya que otros factores como el tamaño y forma del daño, la propagación de la energía de impacto a frecuencias altas, las resonancias del sistema y las fuentes de ruido en frecuencias más bajas pueden significar (y significan) que los filtros más altos producen mejores resultados. Por lo tanto, cuando se determina una estrategia de medición para una aplicación específica, comenzamos con varios tipos de mediciones (y filtros de envolventes) que luego se reducen a los básicos según los resultados reales. Esto es parte de un enfoque al que nos referimos como monitoreo multiparamétrico.

Si bien podría parecer que un acelerómetro de baja frecuencia y alta sensibilidad es el mejor sensor para estas aplicaciones de baja velocidad, el análisis de los datos de campo reales muestra que no es correcto. De hecho, hemos descubierto que el acelerómetro estándar (100 mv/G) funciona mejor en la abrumadora mayoría de los casos. Hay un par de motivos para esto:

1 La respuesta de los sensores de baja frecuencia y alta sensibilidad suele limitarse a entre 1 y 2 kHz, por lo que no son adecuados para filtros de envolvente de aceleración mayores

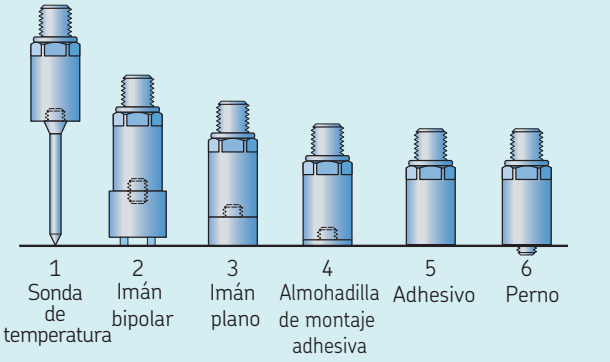
2 Debido a la alta sensibilidad, es posible que las fuentes de ruido puedan ocultar las señales de impulso de los rodamientos o incluso sobrecargar el sensor

Los ejemplos siguientes usan datos recopilados con acelerómetros de 100 mv/G.

El método de montaje del sensor tiene un impacto crucial, en especial cuando se usan técnicas de extracción de función de alta frecuencia (filtros de envolvente más alta). La respuesta de frecuencia completa de los acelerómetros solo puede lograrse con el montaje adecuado (p. ej., montaje con pernos). El uso de un imán, por ejemplo, reducirá drásticamente la frecuencia máxima que puede medir el acelerómetro, p. ej., de entre 15 y 20 kHz a alrededor de entre 3 y 5 kHz (**→ fig. 2**). El montaje permanente es la única manera de obtener una respuesta de frecuencia más alta constante, por lo que recomendamos el montaje con pernos para obtener mejores resultados.

También recomendamos montar el acelerómetro sobre el soporte de rodamientos lo más cerca posible de la zona de carga con el fin de obtener la mejor señal posible. Esto resulta de particular importancia en los casos en que se espera que la energía de impacto del daño del rodamiento sea débil, p. ej., en aplicaciones de muy baja velocidad. Debe tenerse en cuenta que la propagación de la vibración de alta frecuencia se ve negativamente afectada por la distancia así como por las interfaces mecánicas. En la práctica, quizás no sea posible montar el sensor en la ubicación ideal, pero esto no es un impedimento, en especial cuando se usan acelerómetros montados con pernos. Un desafío mayor se presenta cuando puede cambiar la carga del rodamiento (p. ej., cambio en la dirección de carga, condiciones de funcionamiento sin carga). En estos casos, suele ser necesario usar un sistema en línea instalado permanentemente para minimizar el riesgo de un "falso negativo" como sucedería, por ejemplo, si se tomara una medición con el rodamiento sin carga.

Quizás uno de los errores más comunes al intentar hallar problemas en rodamientos de baja velocidad sea no recopilar una forma de onda de tiempo lo suficientemente larga para mostrar claramente las frecuencias de



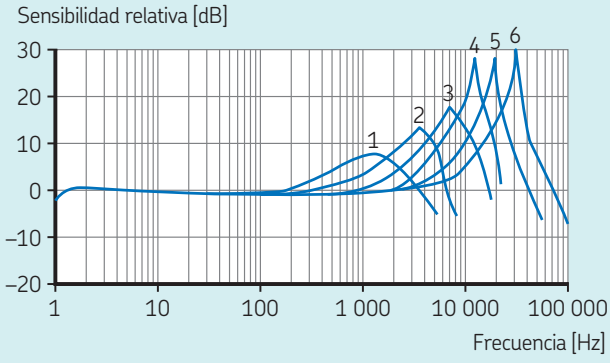


Fig. 2: Respuesta de frecuencia con diferentes métodos de montaje

defectos en el espectro. Una buena regla general es obtener una forma de onda equivalente a, por lo menos, entre 15 y 20 revoluciones del eje. Por ejemplo, para un rodamiento que funciona a 10 r. p. m. (6 segundos por revolución), la forma de onda debe ser, al menos, de entre 90 y 120 segundos. En la práctica, cuanto más larga sea la forma de onda de tiempo, mejores serán los resultados. Esto, sin embargo, debe equilibrarse con factores prácticos, p. ej., un tiempo de recopilación de datos prolongado, más memoria para almacenamiento, etc.

Ejemplo 1: Rodamiento de rodillos de apoyo de horno de cal

Para ilustrar la eficacia de nuestras técnicas de monitoreo de baja velocidad, consideremos el ejemplo de un rodamiento de rodillos de apoyo de un horno que gira a alrededor de 6 r. p. m. (→ **fig. 3**). Las especificaciones de mediciones clave fueron las siguientes:

Dispositivo: Recopilador/analizador de datos FFT portátil

Fig. 3: Rodillos de apoyo de horno de cal

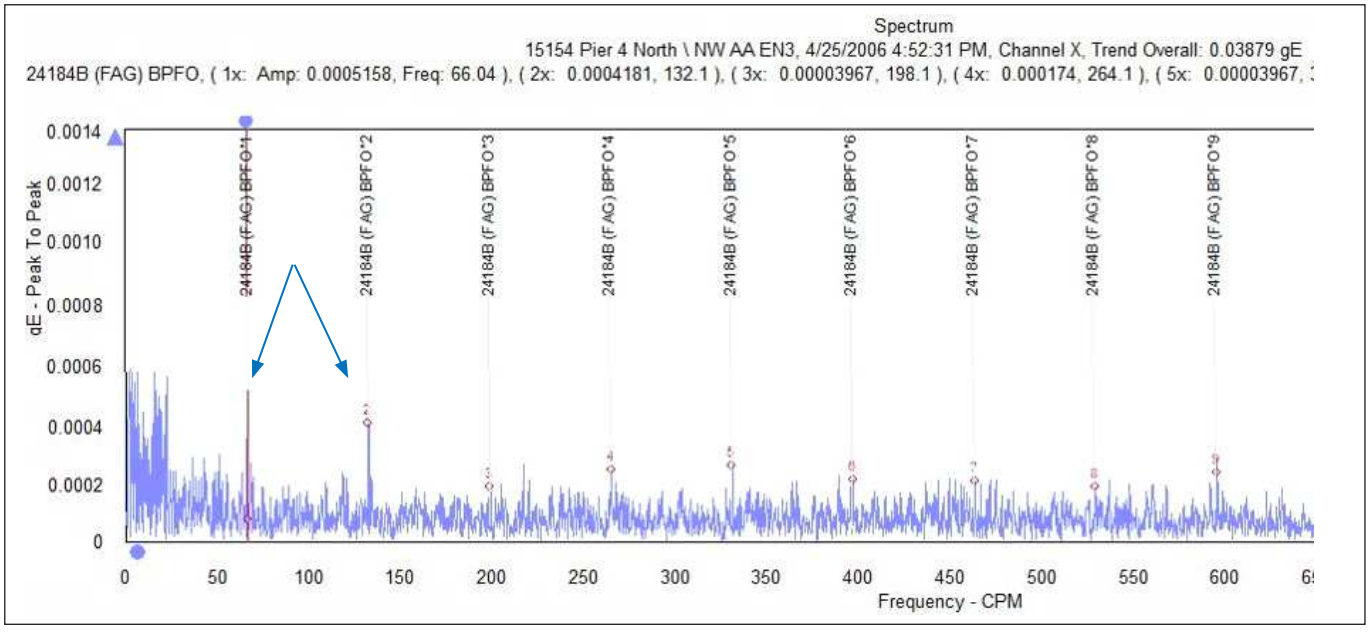


Fig. 4: Espectro de la envolvente de aceleración que muestra daño en la rodadura externa del rodamiento 24184B

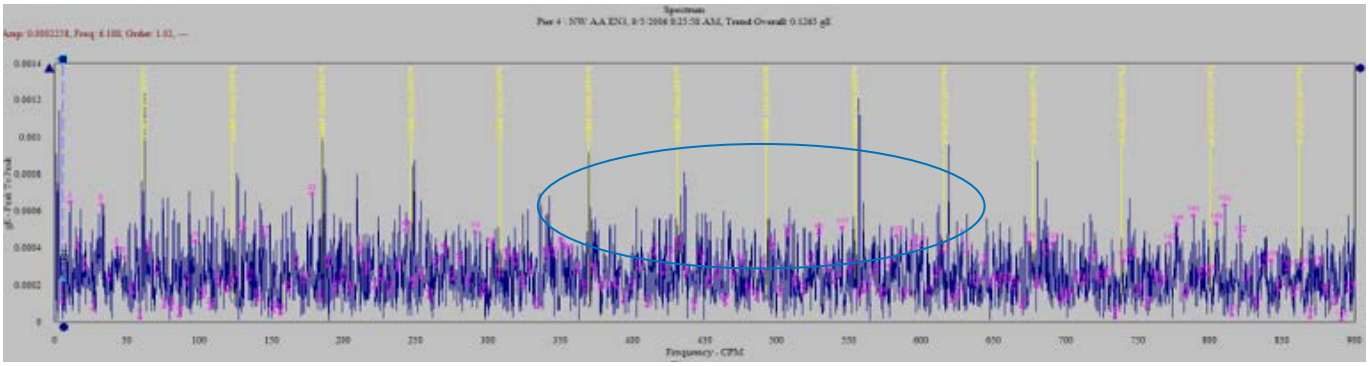


Fig. 5: Espectro tomado cinco meses más tarde que muestra picos menos diferenciados

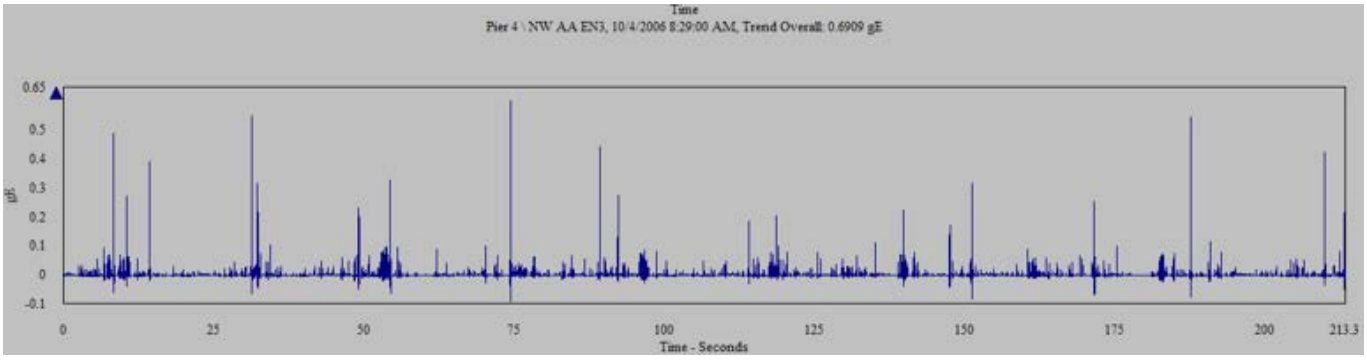


Fig. 6: Forma de onda de tiempo que muestra múltiples impactos de alta energía del daño del rodamiento

Sensor: Acelerómetro de 100 mv/G
Filtro de la envolvente de aceleración: 500–10 000 Hz (Filtro 3 SKF)
Tiempo de medición: 213,3 segundos (nota 1 revolución = 10 segundos; por lo tanto, esto representa más de 20 revoluciones del aro interior del rodamiento).

El daño al aro exterior se detectó por primera vez en abril de 2006. Los picos del espectro de la medición de la envolvente de aceleración coinciden de manera precisa con la frecuencia de defectos esperada del rodamiento, sin dejar dudas de que ha ocurrido daño (→ **fig. 4**).

A medida que un rodamiento se deteriora, es frecuente que los picos del espectro cambien de patrones o pierdan su particularidad debido al potencial crecimiento de la superficie de daño y/o múltiples puntos de impacto potenciales. La **fig. 5** muestra el espectro cinco meses más tarde. Puede verse que los picos (en particular en el primero y segundo armónicos) son menos dominantes, pero los armónicos de mayor orden son ligeramente visibles.

En este punto, el daño había crecido de manera bastante significativa y era necesario reemplazar el rodamiento pronto. La imagen de la forma de onda de tiempo tomada justo antes de que el rodamiento fuera reemplazado en octubre (→ **fig. 6**) muestra múltiples impactos de rodillos sobre el camino de rodadura, lo que indica daño grave. Esto fue verificado cuando se cambió el rodamiento (→ **fig. 7**). Como puede verse a partir del patrón de daño, el rodamiento estuvo sometido a grandes fuerzas axiales.

Resumen de los puntos clave de este caso:

1 El monitoreo de las vibraciones fue eficaz para hallar y hacer el seguimiento exitoso del daño del rodamiento a esta baja velocidad. El parámetro de medición correcto

Fig. 7: Rodadura externa del rodamiento gravemente dañada

(envolvente de aceleración) y el tiempo de medición suficiente fueron las claves.

2 El plazo de entrega de casi seis meses desde la detección inicial hasta el daño grave permitió la planificación adecuada y, de este modo, evitar muchas horas de parada no programada y ahorrar cientos de miles de dólares.

Una característica de este caso, que hizo que la detección y el análisis resultaran bastante directos, es que, a pesar de que la velocidad de giro del rodamiento era muy lenta, era bastante estable durante la adquisición de datos. Además, la carga también fue bastante constante, por lo que, a pesar de que el intervalo de medición fue de varias semanas y las mediciones se tomaron con un recopilador de datos portátil, aún fue posible hacer el seguimiento eficaz de la progresión del daño.

Fig. 8: Prensa de doble rodillo

Ejemplo 2: Rodamiento de prensa de doble rodillo

Sin embargo, la situación cambia en los casos en que la velocidad de giro no es estable. Un buen ejemplo de esto es una prensa

La velocidad comienza a 3:01:32 y termina a 3:17:

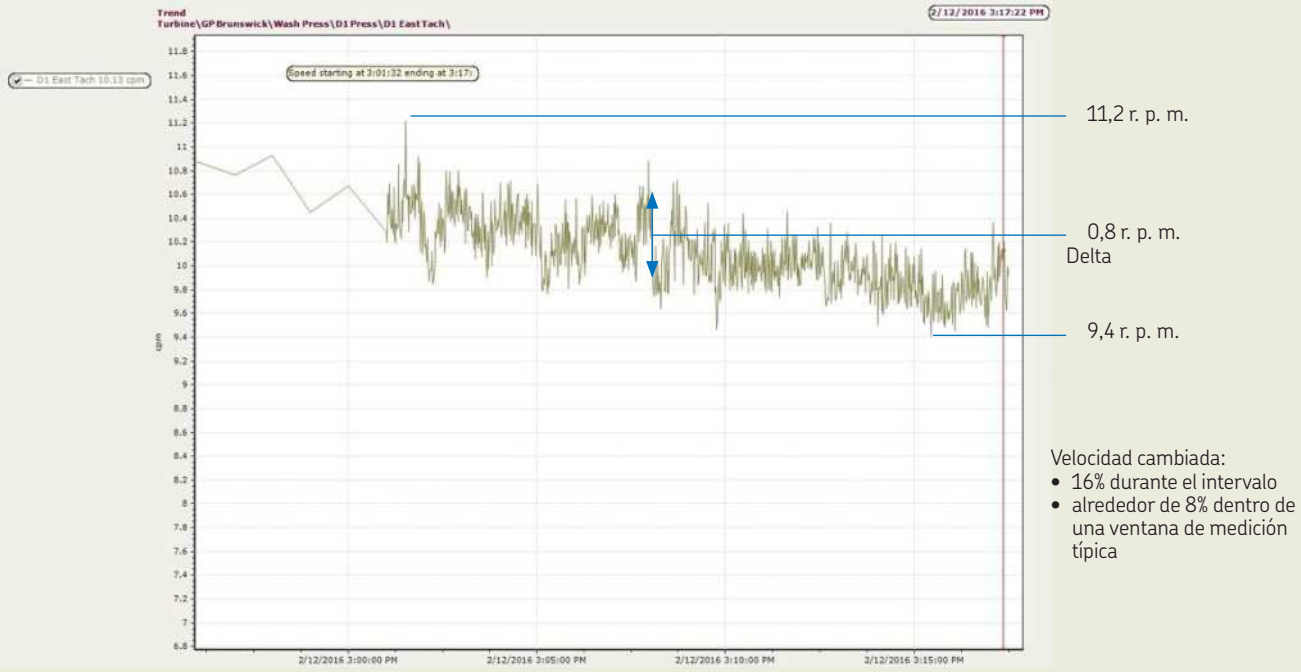


Fig. 9: Ejemplo de velocidad no estable durante el funcionamiento

de doble rodillo que generalmente funciona a alrededor de 6 a 12 r. p. m.(→ **fig. 8**).

Los rodillos de prensa, que son accionados por motores hidráulicos, cambian de velocidad constantemente debido a las condiciones de carga. La **fig. 9** muestra la típica escala de cambios de velocidad durante el funcionamiento normal.

Las prensas de lavado de este tipo han causado problemas de monitoreo (es decir, fallas no detectadas) en el pasado, a pesar del éxito comprobado con las técnicas de vibración en estos rangos de velocidad. Resulta que el principal problema es no tener en cuenta la velocidad de funcionamiento no estable. Debido a los cambios de velocidad durante la adquisición de datos, fue necesario usar una técnica llamada "seguimiento de orden" para evitar el fenómeno de "adherencia" en el espectro resultante. En la **fig. 10,** se muestra el efecto de adherencia.

El seguimiento de orden usa una referencia de velocidad (por ejemplo, impulso de tacómetro) para compensar la velocidad no estable (→ **fig. 11**). El resultado es una forma de onda de tiempo con muestras en los lugares "correctos" (aunque la velocidad cambie durante la medición).

Abajo se muestran algunas especificaciones clave para este ejemplo de prensa de lavado:

Dispositivo: Sistema en línea con capacidades de envolvente y seguimiento de orden
Sensor: Acelerómetro de 100 mv/G

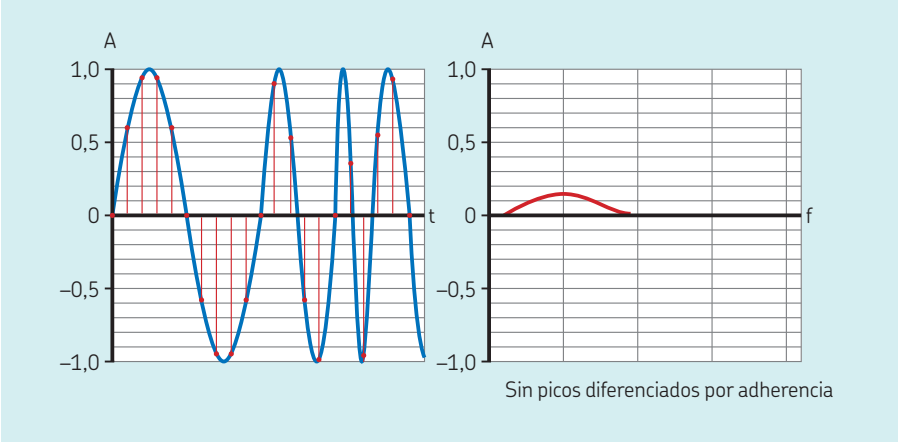


Fig. 10: El muestreo fijo durante el funcionamiento a velocidad no estable da como resultado adherencia

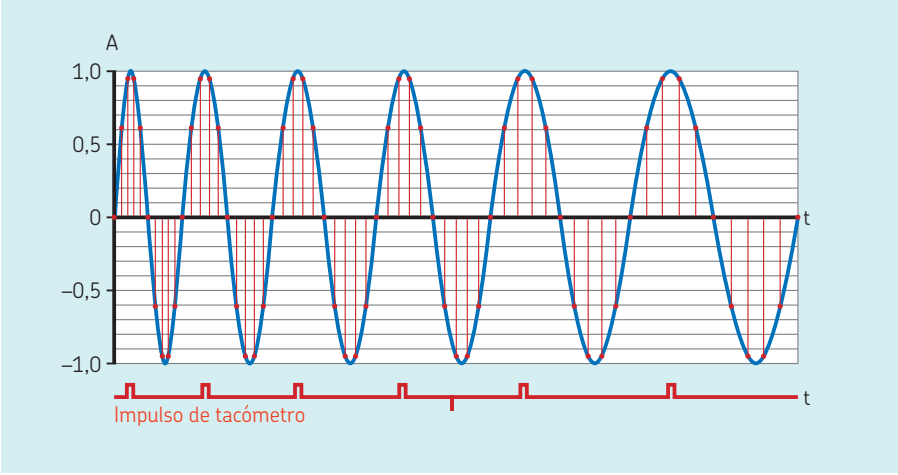


Fig. 11: Seguimiento de orden

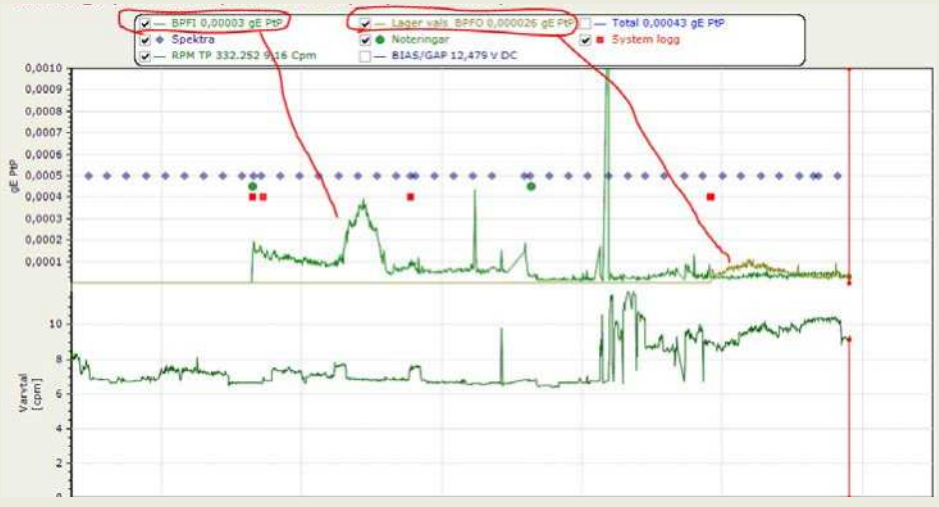


Fig. 12: Tendencia de las frecuencias de rodamientos

Tacómetro: Sensor inductivo (para impulso de referencia)
Filtro de la envolvente de aceleración: De 5 a 40 kHz (Filtro 4 SKF)
Cantidad de órdenes: 100

Debido a que un sistema en línea recopila datos automáticamente, tiene la ventaja de registrar datos a intervalos mucho más cortos de lo posible con un sistema portátil. Esto fue una característica importante para hallar y hacer el seguimiento de las fallas de rodamientos en este caso específico. La **fig. 12** muestra la tendencia de las frecuencias de rodamientos según se midieron con la envolvente de aceleración con seguimiento de orden. Puede verse que la tendencia de daño del aro interior aumentó significativamente a fines de marzo, luego bajó a comienzos de abril. Sin un sistema en línea, es posible que este evento hubiera sido pasado por alto. Las señales de daños de la rodadura externa alrededor de un mes más tarde también apuntaban a una mayor gravedad del daño.

La **fig. 13** muestra el espectro de frecuencia a fines de marzo con picos, armónicos y bandas laterales de defectos del aro interior muy claros. Este tipo de patrón de frecuencia visto a este alto rango de filtro de envolvente indica un pequeño pero afilado defecto del rodamiento.

Se observó que los picos de frecuencia, que habían sido bastante claros, desaparecían después de un tiempo. La **fig. 14** muestra el espectro de frecuencia en julio que, en comparación con la **fig. 13**, no muestra picos que coincidan con las frecuencias de los rodamientos. Se sospechaba que el aro interior podía haber comenzado a deslizarse sobre el eje (que podría pasar con un aro interior fracturado), lo que llevó a la decisión de reemplazar el rodamiento a la primera oportunidad.

En septiembre, un espectro tomado justo antes de que se cambiara el rodamiento mostró picos a la velocidad de rotación y sus armónicos que indicaban aflojamiento (→ **fig. 15**).

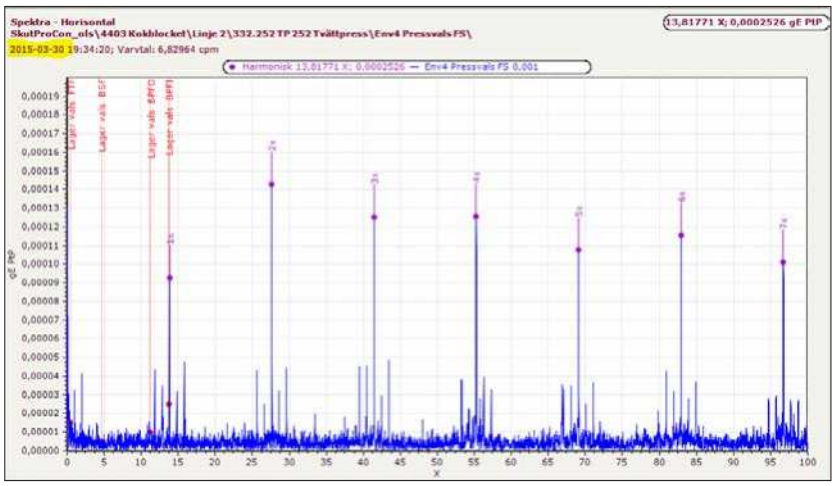


Fig. 13: Espectro de frecuencia que muestra claro daño en el rodamiento en el aro interior

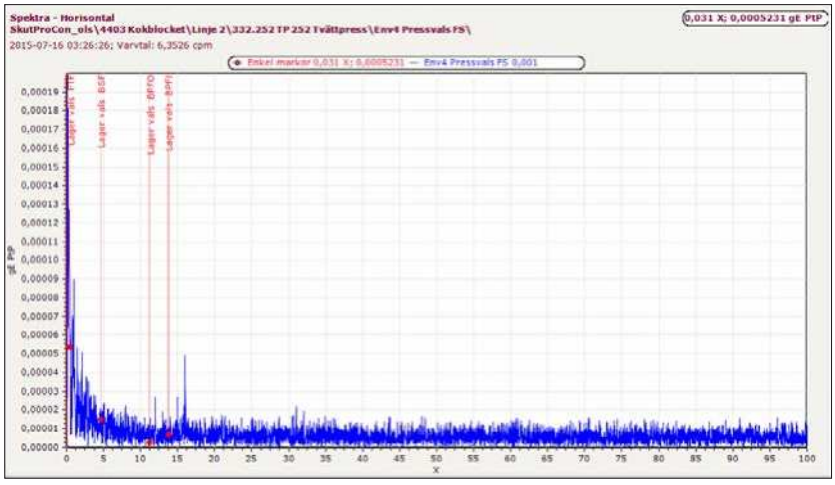


Fig. 14: Espectro tomado en julio; los picos de defectos del rodamiento han desaparecido

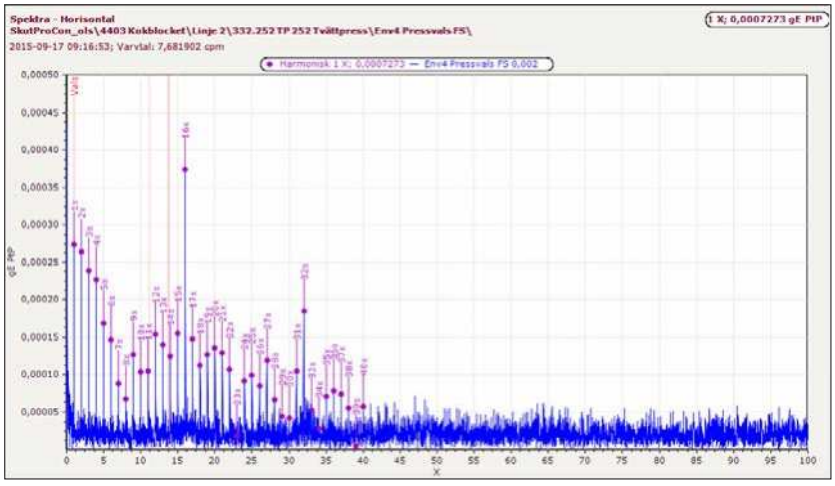


Fig. 15: Espectro que muestra los armónicos a velocidad de funcionamiento, una señal de aflojamiento

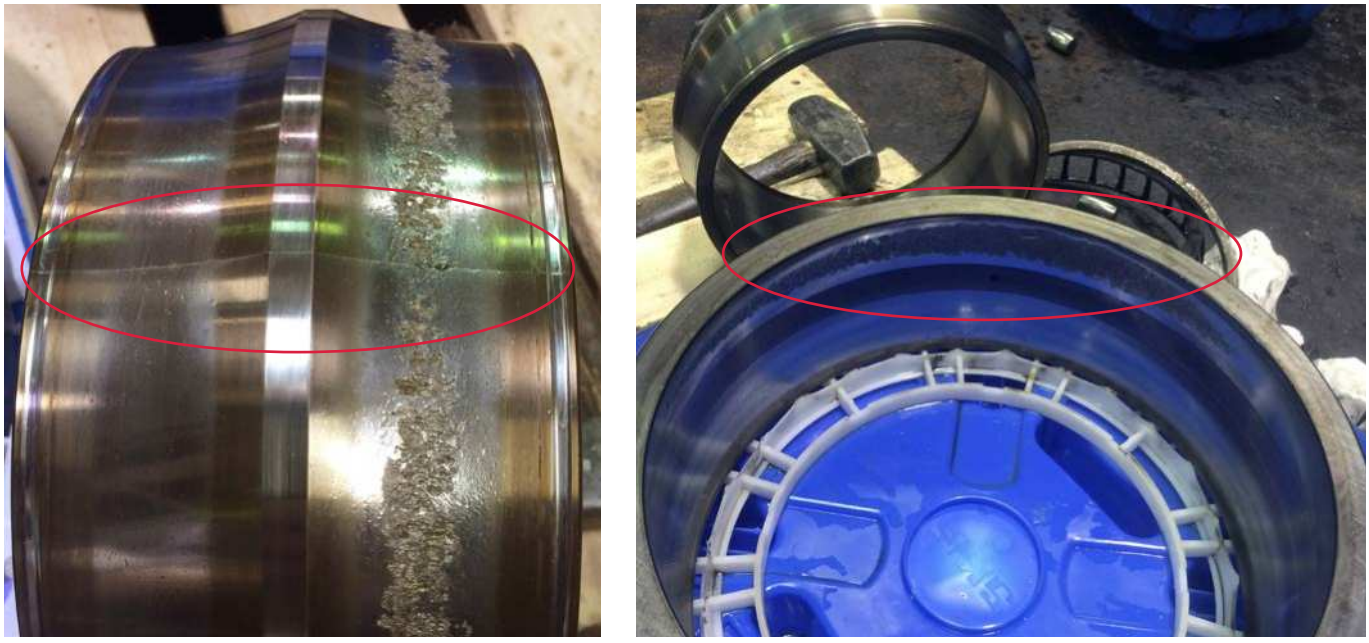


Fig. 16: Aros interior y exterior en rodamiento dañado

La **fig. 16** muestra el rodamiento después de haberlo desmontado y limpiado para el análisis de causa raíz de los fallos. Tanto la fractura del aro interior como el daño de un lado/conjunto de rodillos son claramente visibles. El último indica la posibilidad de sobrecarga en la dirección axial o desgaste por contaminación o lubricación insuficiente.

Los rodamientos de las prensas de doble rodillo tienen una vida útil de alrededor de cinco años o más, pero no es infrecuente hallar instancias en las que duran menos de dos años, especialmente con determinados diseños. Los problemas típicos incluyen:

1 Contaminación con fluidos de proceso a través de los sellos que pierden su eficacia.
2 Esfuerzo axial residual por falta de expansión suficiente debido al desgaste en los soportes.

Es posible lograr una vida útil completa según la causa raíz. Algunas de las acciones que pueden ejecutarse incluyen:

1 Modificar el diseño del sello y mejorar la lubricación del sello.
2 Mejorar la lubricación del rodamiento instalando un sistema de circulación de aceite con separación eficiente de agua y aceite.
3 Reemplazar rodamientos de rodillos a rótula con rodamientos CARB.

En un caso de cliente memorable, las mejoras aumentaron la vida útil del rodamiento de 18 meses a más de cinco años, lo que dio como resultado ahorros totales estimados en USD 500 000.

Puntos clave de este ejemplo:

1 Es necesario entender bien las condiciones de la aplicación, p. ej., la velocidad no estable, para poder usar las técnicas correctas.
2 La obtención de mejores datos de un sistema en línea puede ser la diferencia entre encontrar o pasar por alto un problema en desarrollo en aplicaciones de muy baja velocidad.

Conclusión

En numerosas aplicaciones críticas en las papeleras, hay rodamientos grandes de baja velocidad. Existen técnicas de vibración e instrumentos para monitorearlos con eficacia, pero las fallas no detectadas en algunas aplicaciones de muy baja velocidad han hecho que algunas personas duden de esto. Los principales motivos para pasar por alto fallas de rodamientos son la aplicación incorrecta de técnicas y/o la falta de entendimiento de las condiciones de funcionamiento. La detección y el diagnóstico exitosos de los dos casos con rodamientos que giraban a menos de 10 r. p. m. demuestran la eficacia del monitoreo de vibraciones cuando se aplica correctamente.

Ed Bondoc
Director de Desarrollo de Aplicaciones
Estado de la máquina, industria papelera
ed.bondoc@skf.com

skf.com

® SKF es una marca registrada del Grupo SKF.

© Grupo SKF 2017
El contenido de esta publicación es propiedad de los editores y no puede reproducirse (incluso parcialmente) sin autorización previa por escrito. Se ha tenido el máximo cuidado para garantizar la exactitud de la información contenida en esta publicación, pero no se acepta ninguna responsabilidad por pérdidas o daños, ya sean directos, indirectos o consecuentes, que se produzcan como resultado del uso de dicha información.

PUB 72/S9 11147/18 ES · Noviembre 2017