

Posibilidad de identificar defectos en máquinas rotatorias utilizando la medición de nivel total de la señal vibratoria

L. M. Véliz Marrero, F. Mourdoch Misa

Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería Mecánica
 Instituto Superior Politécnico *José A. Echeverría* (ISPJAE)
 Calle 127 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad Habana, Cuba.
 Teléfono: 53 7-20 2267, Fax: 53 7-27 7129.
 E-mail: lmveliz@mecanica.ispjae.edu.cu

(Recibido el 20 de septiembre de 1999, aceptado el 14 de diciembre de 1999)

Resumen

Se expone una herramienta propuesta por el Dr. C. Cempel, poco difundida para identificar algunos defectos al realizar el diagnóstico de máquinas rotatorias utilizando la medición de Nivel Total. Se ilustra a modo de ejemplo el diagnóstico de un reductor de velocidad.

Palabras claves: Medición, vibraciones, nivel total, diagnóstico, engranaje, reductor de velocidad.

1. Introducción

En el ámbito de la industria cubana cuando se selecciona el sistema de mantenimiento a utilizar teniendo en cuenta las características del proceso productivo y las particularidades de las máquinas, se llega a la conclusión en la inmensa mayoría de los casos, que el sistema de mantenimiento que se debe utilizar para las máquinas esenciales y principales es el sistema preventivo con medición de parámetros síntomas, y en este caso se utiliza generalmente como parámetro diagnóstico la medición de la señal vibratoria, por consiguiente para identificar los defectos se necesita una instrumentación de segundo nivel, la cual requiere de un medidor de señal vibratoria, un captador, un amplificador y un filtro para la obtención de los espectros, los cuales por medio de las frecuencias de diagnóstico permiten la identificación del elemento defectuoso y del tipo de fallo. Esto trae como consecuencias que el tiempo de ejecución y análisis de las mediciones en estos casos es considerable, limitando las posibilidades de ampliar la aplicación del

diagnóstico a una cantidad significativa de máquinas.

Sin embargo existen parámetros especialmente diseñados a partir de mediciones de nivel total utilizando una instrumentación de tercer nivel (sin filtro ni amplificador) que permiten, además de detectar el surgimiento de condiciones anormales, la identificación de determinados defectos; a estos índices estadísticos también se les denominan discriminantes.

2. Acerca de los diferentes tipos de discriminantes [1], [2], [3]

Estos índices estadísticos se utilizan para hacer una valoración general del estado de las máquinas, ya que tienen la propiedad de variar con el aumento de los defectos. La mayoría de los discriminantes están orientados a detectar defectos que presentan carácter impulsivo en su comportamiento, tales como los defectos en engranajes y rodamientos.

En la tabla No. 1 se muestra los discriminantes más utilizados, los cuales pueden ser descritos a través de una formulación general desarrollada por el profesor C. Cempel del Instituto Politécnico de Poznan, Polonia, la cual depende del tipo de discriminante en cuestión.

Tabla 1 Algunos de los discriminantes más utilizados en el diagnóstico.

En el dominio de la amplitud	
Discriminantes Dimensionales	
Root frequency	U_r
Promedio	U_{PRO}
Root mean square	U_{RMS}
Pico	\hat{U}
Discriminantes Adimensionales	
Factor de forma K	U_{RMS} / U_{PRO}
Factor de cresta C	\hat{U} / U_{RMS}
Impulsividad I	\hat{U} / U_{PRO}
Raíz cuarta de Kurtosis	$\beta^{1/4}$
En el dominio de la frecuencia	
Rice frequency	f_U
Índice Armónico	$H_{(U)}$
Mached filter	M_{RMS}
En el dominio del tiempo	
Factor K	$U_{RMS}(t_0) \hat{U}(t_0) / U_{RMS}(t) \hat{U}(t)$

U: señal de vibración: (desplazamiento, velocidad o aceleración).

Para los discriminantes en el dominio de la amplitud la función que los caracteriza es la función de densidad de probabilidad P, muy utilizada en el diagnóstico de engranajes. Cuando estos se encuentran en buen estado la “campana” o la configuración normal de la función se utiliza como patrón, si este valor aumenta es indicio de alguna alteración en el sistema, por ejemplo: la amplitud de la distribución varía de forma significativa como resultado del desgaste, y un cambio en la forma de la curva se observa cuando ocurre una fractura del diente.

Los discriminantes dimensionales se utilizan para evaluar de forma global un equipo y su valor depende fundamentalmente de la carga aplicada y de la velocidad de rotación. La fórmula general es:

$$U_d = \left[\int_{-\infty}^{\infty} |U^m| P(U) dU \right]^{1/m}$$

Los valores de los coeficientes son:

Discriminante U_d	Coefficiente m
Root frequency	$1/2$
Promedio	1
Root mean square	2
Pico	α

Los discriminantes adimensionales tienen la ventaja que se obtienen a partir de mediciones de Nivel Total de

la señal (sin filtrar) con instrumentos más simples, pero son sensibles a variar su valor con la aparición de ciertos defectos, principalmente de carácter impulsivo como los que se producen en engranajes y rodamientos.

$$E_u = \frac{\left[\int U^l P(U) dU \right]^1}{\left[\int U^m P(U) dU \right]^1/m}$$

Los valores de los coeficientes son:

Discriminantes E_U	Coeficientes	
	l	m
Factor de forma K	2	1
Factor de cresta C	α	2
Impulsividad I	α	1
Raíz cuarta de Kurtosis	4	2

Por ejemplo, el valor del factor Kurtosis es aproximadamente 3 cuando la máquina está en buen estado. Con el tiempo de explotación y la correspondiente degradación de sus elementos dicho factor aumenta hasta valores máximos de 16 y a partir de este valor comienza a descender, lo que constituye una alerta para programar la reparación del equipo.

Existen varios discriminantes en el dominio del tiempo, y para cada uno hay una formulación diferente. Uno de los más utilizado es el Factor K el cual forma parte del sistema de medición de algunos instrumentos y se utiliza para evaluar rodamientos.

El análisis en el dominio de la frecuencia se basa en la descomposición de la vibración en el conjunto de las infinitas señales puras que componen la señal real, cada una con su amplitud y su frecuencia. Y la relación entre los dominios del tiempo y la frecuencia es por medio de la transformada de Fourier.

Al analizar el incremento de los niveles de vibración a determinadas frecuencias significativas es posible identificar los defectos que presentan las máquinas. Estas frecuencias se conocen con el nombre de frecuencias de diagnóstico y se calculan a partir de relaciones y fórmulas que aparecen en la literatura especializada.

Los discriminantes en el dominio de la frecuencia se calculan mediante fórmulas donde interviene el parámetro frecuencia, por ejemplo, el Índice Armónico es la relación del producto entre los procesos de integración y derivación con respecto al proceso original. Este parámetro es un indicador cuyo valor es proporcional al rango de frecuencias que presentan amplitudes significativas y por consiguiente es un indicador de la intensidad de fallos; siendo su expresión:

$$H_U = \frac{\int U_{RMS} dt}{(U_{RMS})^2} d(U_{RMS}) / dt$$

En el caso del Índice Armónico de Velocidad utilizado en este trabajo la expresión es la siguiente:

$$H_V = \frac{a_{RMS} * d_{RMS}}{v_{RMS}^2}$$

Donde:

a, d, v: aceleración, desplazamiento y velocidad de la señal vibración

A pesar de realizar las mediciones de nivel total solo se obtiene información del estado técnico de la maquina rotatoria, la combinación de estos parámetros, en forma de discriminante puede informar cuando algunos de los elementos presenta síntoma de deterioro, por ejemplo el índice armónico de velocidad permite evaluar holguras en pares cinemáticos. El valor recomendado por C. Cempel para dicho parámetro es de alrededor de 1.14 para un estado estado técnico de los pares cinemáticos y para la presencia de defectos, mayor de 1.43.

El *Rice frequency* puede interpretarse como la frecuencia media del proceso e indica alrededor de en cual frecuencia está concentrada la energía de la señal vibratoria. Si no existen engranajes y rodamientos con defectos el valor del discriminante es menor que 5 veces la frecuencia fundamental (o de rotación) de ese elemento. Con la presencia de deterioros en estos componentes ese valor aumenta y puede ser calculado por la siguiente expresión:

$$f_u = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\int_0^\infty f^2 G_{uu}(f) df}{\int_0^\infty G_{uu}(f) df} \right]^{1/2}$$

Siendo:

$G_{uu}(f)$: Densidad espectral de potencia de $U(t)$

f: Frecuencia expresada en Hz

Si se considera que durante la etapa incipiente del surgimiento de defectos en engranajes y rodamientos, debido al carácter impulsivo de estos, surgen componentes de vibración a altas frecuencias, los valores altos de dicho parámetro estarán asociados a la existencia de defectos con estas características. Mientras no exista fallo, este valor se mantiene estable.

El discriminante para la velocidad toma la forma siguiente:

$$f_V = \frac{a_{RMS}}{2\pi v_{RMS}}$$

3. Diagnóstico de un reductor de velocidad [5], [6], [7]

Se realizó el ensayo en un banco de pruebas que está compuesto por los elementos siguientes:

- Motor eléctrico marca VEM con potencia nominal de 4.8 kW y 1735 r.p.m.
- Freno Pronit para la aplicación de la carga.
- Reductor sinfin de la firma Radicon con relación de transmisión 30, tornillo sinfin de una entrada y una capacidad nominal de 11.19 kW. Velocidad de rotación :

	r.p.m.
Tornillo sinfin	1156
Corona	38

Se utilizó para medir las vibraciones el sonómetro 2203 marca B&K que tiene un rango para la aceleración de 10 Hz a 20 kHz, para la velocidad de 25 Hz a 5 kHz y de desplazamiento de 50 Hz a 2 kHz. El acelerómetro utilizado es el KD-35 con sensibilidad 49 mv/g y un peso de 29.4 gr.

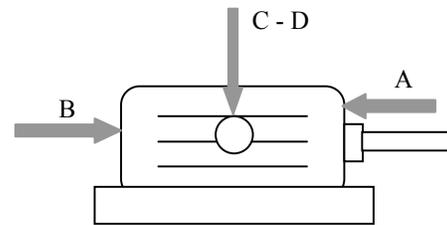


Fig.1 Puntos de medición de vibraciones en el reductor RADICÓN

Tabla 2 Descripción de los puntos de medición.

Pto.	Rodamiento a diagnosticar	Dirección
A	Sinfín lado motor	Axial
B	Sinfín lado acoplamiento	Axial
C	Corona lado libre	Vertical, axial
D	Corona lado freno	Vertical, axial

Se realizaron mediciones de Nivel Total de aceleración, velocidad y desplazamiento Pico y RMS, las cuales aparecen en las tablas 3 y 4, y en esta última se incluyen los valores de los discriminantes Índice Armónico y *Rice frequency* para velocidad.

Tabla 3 Valores de aceleración(A), velocidad(V) y desplazamiento Pico(D).

Parámetro	Pto. A	Pto. B	Pto. C	Pto. C
A [m/s ²]	20	18	15	12
V [mm/s]	24	25	17	19
D [mm]	0.05	0.06	0.022	0.025

Tabla 4 Valores de Nivel Total RMS, Rice frequency (f_v) e Índice Armónico de velocidad(H_v)

Parámetro	Pto. A	Pto. B	Pto. C	Pto. D
A [m/s ²]	14	13	10.5	8.08
V [mm/s]	16.5	18	12	13
D [mm]	0.04	0.057	0.022	0.02
f_v	135.1	115	139.3	989.7
H_v	2.05	2.28	1.16	1.04

Los resultados que se obtienen de la información de las tablas es la siguiente:

- Los valores pico son comparados con la Norma ANSI/AGMA 6000-A88 para engranajes clase A con menos de 25.4 m/s de velocidad periférica del elemento motor, obteniéndose que los valores de velocidad y aceleración **sobrepasan el criterio de admisible** de esta norma, por lo que se debe tomar como una **señal de alerta**
- Con los resultados obtenidos de la tabla No.4 para el índice armónico se debe prestar atención en los puntos A y B pues indican que deben existir holguras en los pares cinemáticos. Lo que no puede detectarse es si el defecto es en los engranajes o en los rodamientos.
- Los valores del Rice frequency que se muestran son similares exceptuando el punto D, donde aumenta considerablemente el valor, por lo que se presume que el rodamiento de la rueda en el lado del freno presenta problemas.

4.Comprobación de la herramienta propuesta

Con el fin de comprobar la efectividad del diagnóstico por medio del Índice Armónico y el Rice frequency se obtienen espectros discretos de octava con para comparar las frecuencias a las cuales la amplitud presenta sus valores mayores con las frecuencias de diagnóstico.

Del cálculo de las frecuencias de diagnóstico se obtienen los principales defectos para cada banda del espectro de octava, abulados en la tabla 5.

A partir de las mediciones de octava (de aceleración, velocidad y desplazamiento) se procedió a calcular el

Índice Armónico por bandas de frecuencias cuyos valores se muestran en la tabla 6.

A partir de los resultados anteriores se puede plantear lo siguiente:

- Existe un elevado rozamiento entre el par cinemático tornillo – rueda.
- Existen holguras no adecuadas en el par de engranajes
- Debe revisarse el rodamiento B y el D
- No parecen presentar problemas los rodamientos A y C.

Tabla 5 Frecuencias de diagnóstico. [4]

Hz	Defecto que se refleja midiendo	
	en A y B axial	en C y D vertical
31.5	Desalineamiento rodamientos A y B Holguras excesivas Deterioro local sinfín	Excentricidad Desbalance Pérdidas mecánicas
63	Grietas en sinfín Desalineamiento rod. B	Pérdidas mecánicas Desbalance
125	Rigidez variable sinfín	Defecto rod. C y D
250	—	Deterioro Corona Rigidez Variable

Tabla .6 Índice Armónico por frecuencias.

Pto./frec	31.5	63	125	250
A	1.48	1.35	1.11	0.99
B	1.68	1.79	1.28	1.61
C	1.65	1.35	1.29	1
D	-	-	1.55	1.25

Este diagnóstico corrobora el anterior realizado a partir de mediciones de nivel total, pero es un poco más preciso.

El uso de los discriminantes no pretende ser un arma poderosa para el diagnóstico, pues es conocido por las personas que realizan esta actividad que no puede sustituirse la eficacia y la exactitud de un análisis espectral o el procesamiento del espectro en forma de ceptrum y de autoespectro, así como la demodulación en fase o amplitud de los mismos para la identificación de defectos en máquinas, pero para estos y otros métodos que existen es necesario una instrumentación de primer nivel y un tiempo de medición y análisis considerables por parte de un personal altamente calificado en instrumentación, vibraciones y diagnóstico.

5. Conclusiones

La utilización de los Índices Estadísticos o Discriminantes proporciona las siguientes ventajas:

- Permite la identificación de defectos en engranajes y rodamientos utilizando las mediciones de Nivel Total de la señal vibratoria.
- Necesita un corto tiempo de análisis y procesamiento de las mediciones para la toma de decisiones importantes (utilizar una instrumentación de 1er o 2do nivel, detener el proceso, dar prioridades de mediciones a puntos o a máquinas).
- Es muy efectivo en el diagnóstico de equipos que están compuestos por varios cojinetes o engranajes iguales, por ejemplo en la evaluación efectuada a las chumaceras de apoyo del horno rotatorio de la empresa REMETAL, donde se diagnosticó por medio de nivel total y discriminantes 8 chumaceras en muy poco tiempo y de forma muy certera, pues al poseer los elementos las mismas características, la presencia de defectos hace variar el valor significativamente con respecto al resto.
- Es factible su aplicación en diferentes tipos de equipos: se ha utilizado con éxito en un reductor, en un ventilador de tiro inducido, en el sistema de giro del horno antes mencionado, etc.
- No se necesita una alta calificación y conocimientos avanzados en instrumentación y diagnóstico para realizar las comprobaciones a un grupo de máquinas por medio de estos índices. Si es detectada alguna condición anormal puede solicitarse la presencia de personal con más experiencia.

- Refleja la realidad del estado técnico de rodamientos y engranajes de forma más personalizada que las normas internacionales.
- Es una opción más que se ofrece al investigador o al personal de una industria dedicado a la difícil tarea del diagnóstico, una solución que ofrece rápidas conclusiones para tomar decisiones posteriores.

6. Bibliografía

1. Cempel, C. Diagnostically oriented measures of vibroacoustical processes. University of Poznan. Poland, 1980
2. Mathew, J. The monitoring of gear box vibration operatin under steady conditions. Clayton University. Australia, 1989
3. Scheithe W. Vibration measurement a method for early detection o rolling elements bearing failures. Practice of vibration analysis 13. Schenck, 1980
4. Mourdoch F. SPDP Sistema de Programas para el Diagnóstico Predictivo. ISPJAE, 1991
5. Véliz L. M. Mourdoch F. "Utilización de discriminantes en sistemas de mantenimiento preventivo – predictivo. II Taller Internacional de mantenimiento TIMANTE'96
6. Sao R. Lago A. "Control de calidad de reductores sinfin mediante el análisis de las vibraciones" Tesis de Diploma. ISPJAE, 1996
7. Véliz L. M. "Evaluación del estado técnico de reductores de velocidad mediante técnicas de diagnóstico. Tesis de Maestría. ISPJAE, 1997.

Possibility of identification of defects in rotatory machinery by means of total level mesurations.

Abstract

In this paper is exposed a not much divulged tool proposed by Dr. C. Cempel for the identification of some defects by means of the measurement of Total Level of vibration in diagnosis of rotatory machinery. As example, a speed reducer diagnostic is presented.

Key words: Vibration measurement, total level, diagnostic, gears, speed reducer.