



I DIFETTI DEI CUSCINETTI A ROTOLAMENTO

Breve analisi delle tecniche di monitoraggio

In questo articolo vengono presentati sinteticamente i principali metodi di analisi delle vibrazioni dei cuscinetti a elementi rotanti utilizzati da 01dB-Stell con l'impiego di trasduttori accelerometrici per le misure periodiche e puntuali.

Viene presentato un caso pratico allo scopo di confrontare le caratteristiche dei diversi metodi di analisi comunemente usati.

1 Il comportamento meccanico e vibratorio dei cuscinetti a rotolamento

La struttura dei cuscinetti a rotolamento

Il cuscinetto a elementi rotanti viene ampiamente utilizzato in numerose applicazioni meccaniche. I fattori determinanti nel progetto di un cuscinetto a elementi rotanti sono rappresentati dalla coppia "Carico-Velocità di rotazione" dell'albero sul quale verrà calettato.

Attenzione: Nelle applicazioni comuni, per valori superiori a 2 MW e 1500 rpm, vengono utilizzati cuscinetti a film d'olio.

Il cuscinetto a rotolamento è costituito da quattro componenti, (*Figure 1 e 2*):

- Anello interno
- Anello esterno
- Elementi rotanti
- Gabbia

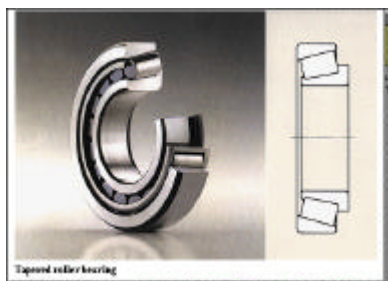


Figura 1: Fag mod. 30320 foto

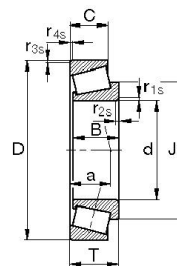


Figura 2: Fag mod. 30320 sezione

Durata di vita

La durata di vita di un cuscinetto a elementi rotanti dipende da numerosi parametri di insieme (qualità del montaggio, lubrificazione, carico, elementi inquinanti, carichi statici e dinamici, qualità del materiale, ecc.).

E' statisticamente noto che il più importante fattore di usura dei cuscinetti a elementi rotanti è rappresentato dalla perdita di lubrificazione. La frizione tra le superfici a contatto determina una sovra temperatura locale tale da alterare le proprietà del materiale e generare rotture a fatica. Le micro particelle metalliche asportate inquinano il lubrificante e determinano una azione abrasiva sulle superfici di scorrimento (anelli esterno e interno).

Aspetto fisico dell'usura

Ogni volta che un elemento rotante passa attraverso una cricca (difetto) viene generato un impulso. Immaginiamo di colpire una campana, il suono generato si smorza gradualmente (un impulso di energia fornito a una struttura viene assorbito e smorzato dai fenomeni di risonanza locale).

Analogamente si comporterà la struttura del cuscinetto eccitata dagli impulsi generati dalle difettosità residenti parte sugli anelli esterno e interno, parte sugli elementi rotanti o sulla gabbia.

Il progressivo deterioramento delle superfici di scorrimento genererà un rumore continuo a banda larga nel dominio delle alte frequenze.

Un cuscinetto a elementi rotanti , grazie alla sua elevata rigidezza , avrà la sua prima risonanza nel dominio delle alte frequenze.

Il modello tipo di evoluzione dello stato di usura di un cuscinetto a rotolamento (Figura 3) in relazione all'energia della vibrazione è distribuito su tre differenti aree:

area I: cuscinetto in buone condizioni operative

area II: presenza di alcune cricche a fatica

area III: usura diffusa.

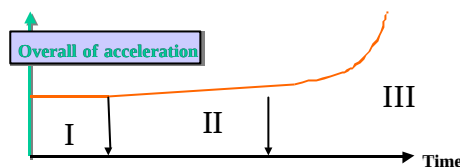


Figura 3: Modello di usura tipo del cuscinetto a elementi rotanti

Quando il livello di usura del cuscinetto a rotolamento raggiunge l'area III la curva di evoluzione diviene esponenziale ed esso può essere gravemente danneggiato in breve tempo.

La principale difficoltà di diagnosi consiste nel "predire" la durata di vita prima della rottura.

Attenzione: Nel caso di lubrificazione difettosa, il modello di evoluzione dell'usura dato in Figura 3 è simile; il reingrassamento del cuscinetto può determinare il ritorno alla prima area (se l'operazione viene eseguita in tempo utile).

Analisi della vibrazione

La misura della vibrazione viene considerata, da molti anni, un eccellente strumento di monitoraggio della condizione dei cuscinetti a rotolamento. Alcune fra le tecniche di analisi vantaggiosamente utilizzate sono:

- Metodo del valore globale
- Metodo di rilevazione del picco
- Metodo statistico
- Concatenazione dello spettro
- Spettro envelope

Questi metodi di monitoraggio sono disponibili sulla maggior parte dei collettori dati.

Limiti della analisi della vibrazione

Sfortunatamente l'analisi delle vibrazioni deve tenere conto di una infinità di situazioni relative agli elementi rotanti e ciò rende difficoltosa una diagnosi immediata e sicura. Il livello della vibrazione per un determinato tipo di cuscinetto non sarà necessariamente lo stesso per un altro tipo (a parità di condizione di usura).

Non esiste alcuna norma che indica i limiti di vibrazione per i cuscinetti a elementi rotanti.

Inoltre l'analisi delle vibrazioni dei cuscinetti a rotolamento con basse velocità di rotazione presenta qualche difficoltà anche nei casi di monitoraggio periodico.

La proposta 01dB-Stell

Fortunatamente, una accurata analisi delle vibrazioni permette di scoprire la maggior parte dei difetti dei cuscinetti, dalle cricche a fatica ai fenomeni di usura in generale.

01dB-Stell continua a sviluppare efficaci strumenti di analisi dedicati ai tecnici della manutenzione per perfezionare le tecniche di diagnosi dei cuscinetti a elementi rotanti, tra questi il DEFECT FACTOR.

Nel seguito vengono illustrati i metodi di analisi più comuni al fine di fornire elementi utili alla loro corretta utilizzazione.

Viene inoltre presentato un caso pratico relativo a un cuscinetto a rotolamento a bassa velocità di rotazione per porre in evidenza i limiti e i vantaggi dei metodi di analisi comuni.

Attraverso questo caso viene descritta la tecnica di analisi con l'indicatore statistico KURTOSIS che è implementato sul collettore dati MOVIOLOG2 proposto dalla 01dB-Stell.

2 Principali metodi di monitoraggio dei difetti e dell'usura dei cuscinetti a elementi rotanti

Metodo del valore globale

Il metodo del valore globale fornisce una rappresentazione semplice e intuitiva dell'energia della vibrazione o del rumore del cuscinetto (se si tocca con la mano il supporto del cuscinetto si ha la sensazione dell'entità dell'energia in gioco ma solo nel dominio delle basse e medie frequenze).

Il rumore generato dagli elementi rotanti del cuscinetto è situato nel dominio delle alte frequenze , tipicamente da 3000 a 20.000 Hz.

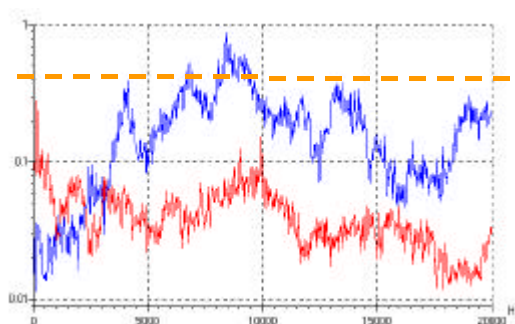


Figura 4: Spettri del rumore del cuscinetto a elementi rotanti

Nella Figura 4 è possibile osservare l'incremento del rumore generato dal cuscinetto con l'innesco di un processo di usura (traccia blu) rispetto al cuscinetto nuovo (traccia rossa). L'uso del parametro accelerazione è necessario per una corretta misura della vibrazione fino a 20 kHz.

Il valore globale dell'accelerazione dipende dal carico, della lubrificazione e della velocità di rotazione delle macchine; le soglie di allarme devono conseguentemente essere adattate.

Attenzione: Le cricche a fatica (area II di Figura 3) non producono, di norma, energia sufficiente per essere facilmente diagnosticate nello spettro del rumore del cuscinetto.

- ❑ Le **soglie di accettabilità** del valore globale della accelerazione non vengono fornite dalla normativa di riferimento. Sulla base all'esperienza acquisita da 01 dB-Stell possono essere assunti i seguenti valori di soglia del livello efficace di accelerazione (per una macchina con velocità di rotazione da 1500 a 3000 rpm):

Velocità di rotazione [rpm]	1500	3000
Soglia di Allarme [g_{rms}]	3	4
Soglia di Pericolo [g_{rms}]	6	8

Questi valori di soglia vengono forniti a titolo puramente indicativo e sono suscettibili di variazioni anche sulla base di monitoraggi più accurati.

- ❑ La **soglia di attenzione** di 0.4 g_{rms} indicata sugli spettri di Figura 4 (linea gialla tratteggiata) rappresenta, in prima approssimazione, un livello di sensibilità dell'innesco del processo di usura del cuscinetto a rotolamento.

Metodo evoluto del valore globale 01dB-Stell [Defect Factor]

Al fine di migliorare la capacità di diagnosi del parametro accelerazione globale che non sempre pone in evidenza i difetti associati all'area II (cricche a fatica), 01dB-Stell ha sviluppato il Defect Factor in collaborazione con EDF (produttore di energia elettrica francese). Il Defect Factor mette evidenza i difetti dei cuscinetti allo stadio iniziale e rileva il rumore generato dai processi di usura.

Il Defect Factor è un parametro che combina il valore di picco (le cricche generano impulsi) con il valore efficace globale dell'accelerazione.

$$F_D = a.F_C + b.A_{RMS} \qquad F_C = \frac{A_C}{A_{RMS}}$$

dove: A_C è il valore di picco A_{rms} è il livello rms (3 - 20 kHz)
a e **b** sono coefficienti specifici ricavati da test effettuati su più di 2000 cuscinetti.

Le più importanti caratteristiche del parametro Defect Factor sono:

- Facilità di utilizzo
- Monitoraggio esteso dalle cricche ai processi di usura in genere
- Una sola scala di valutazione indipendente dalla velocità di rotazione (da 0 a 12).

I valori di soglia comunemente usati sono 6 per la soglia di allarme e 10 per la soglia di pericolo.

Il parametro Defect Factor è utilizzato per i motori elettrici, pompe e ventilatori.

Esso non può essere utilizzato sulle macchine che generano shocks e che abbiano una velocità di rotazione inferiore a 600 rpm.

Il parametro Defect Factor è disponibile sugli strumenti MULTIVIB, MINILOG e MOVIOLOG2.

Metodo Statistico KURTOSIS

L'indicatore statistico KURTOSIS è il risultato di un algoritmo di calcolo effettuato su di un determinato range di frequenza del segnale temporale. Esso descrive il carattere impulsivo del segnale stesso.

In assenza di fenomeni impulsivi nel segnale temporale (segnale a distribuzione Gaussiana) il valore di KURTOSIS è 3 mentre può raggiungere un valore maggiore di 50 in presenza di shocks.

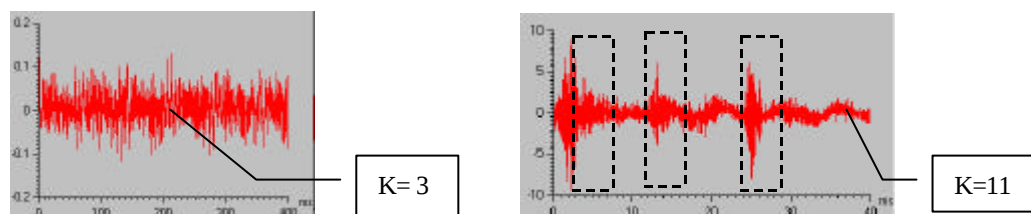


Figure 5: Segnale temporale e KURTOSIS

Nella Figura 5 gli impulsi (evidenziati dai rettangoli tratteggiati) generati da un difetto del cuscinetto incrementano l'indicatore KURTOSIS da $K=3$ a $K=11$.

Per le macchine generatrici di impulsi periodici - p.es. scatole ad ingranaggi - l'indicatore KURTOSIS non è appropriato (così come il Defect Factor).

Viceversa, esso è vantaggioso per il monitoraggio delle macchine rotanti a bassa velocità dove può essere usato in alternativa alla misura del valore globale.

La difficoltà nell'uso di KURTOSIS risiede nella corretta selezione del range di frequenza per il calcolo e deve essere convalidato attraverso una verifica di congruenza con il valore globale di accelerazione.

Analisi di spettro

Le analisi di spettro effettuate con il metodo avanzato di 01dB-Stell (spettro concatenato) permettono di determinare il rumore e le cricche a fatica presenti sul cuscinetto.

La localizzazione automatica delle frequenze cinematiche (piste esterna e interna, elementi rotanti e gabbia) e l'uso dei cursori armonici e di banda laterale sono gli strumenti più efficaci per l'analisi del comportamento vibratorio dei cuscinetti a elementi rotanti (vedi Figura 6).

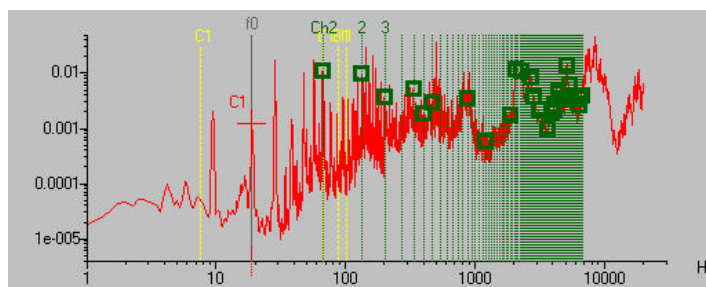


Figure 6: Cursori di localizzazione automatica delle frequenze dei difetti e loro armoniche

Il firmware VIBGRAPH per la rappresentazione grafica costituisce un eccellente strumento di indagine per individuare tutti i tipi di difetti nello spettro concatenato.

In taluni casi l'analisi di spettro fornisce delle informazioni complementari sui difetti del cuscinetto attraverso l'analisi delle bande laterali generate dalla modulazione di ampiezza (vedi Figura 7).

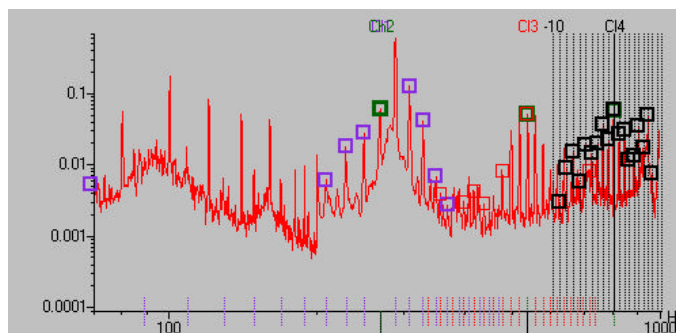


Figure 7: Frequenze dei difetti e della modulazione @ frequenza di rotazione.

Nella Figura 7 si possono osservare tre aree relative alle frequenze dei difetti e alla modulazione di ampiezza (marcatori blu, rossi e neri).

Analisi di spettro envelope

Le analisi di envelope (dette anche demodulazione di ampiezza in riferimento all'algoritmo di calcolo) trovano ampia diffusione anche se l'uso di questi calcoli non sempre viene adeguatamente approfondito.

L'impulso di energia prodotto dall'impatto di un elemento rotante con una cricca non sempre è in grado di far vibrare il cuscinetto ma è spesso sufficiente ad eccitare le sue risonanze. La risposta del cuscinetto è di norma situata nel dominio delle alte frequenze. Più profonda è la cricca, più intensa è l'eccitazione e più elevata è l'intensità della risonanza.

Gli spettri envelope vengono utilizzati in aggiunta agli spettri lineari della vibrazione per facilitare l'individuazione delle frequenze dei difetti. Immaginiamo di dare un colpo di martello su una campana, essa sarà sede di risonanze e produrrà un suono. Se i colpi vengono dati periodicamente (p.es. quattro volte in successione come in Figura 8), la sua risposta apparirà per quattro volte consecutive. Si avrà una modulazione in ampiezza della frequenza di risonanza della campana. Il dato più interessante è rappresentato dalla frequenza degli impulsi che può essere trovata per mezzo dello spettro envelope del segnale modulato. L'operazione di envelope viene effettuata con la trasformata temporale di HILBERT (switch di 90° del segnale originario) e il successivo modulo di calcolo fornisce direttamente l'envelope.

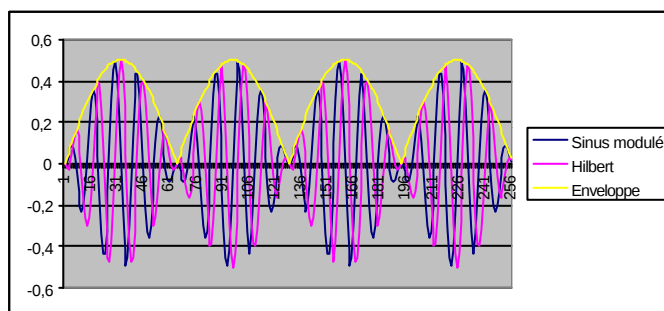


Figure 8: Segnale modulato, trasformata temporale di HILBERT e calcolo di envelope.

Gli spettri sono ricavati dal segnale temporale di envelope.

Normalmente, il calcolo di envelope viene effettuato nel dominio delle alte frequenze (filtraggio passa alto) per garantire la sola presenza dei difetti del cuscinetto annullando l'inquinamento delle medie e basse frequenze.

Gli spettri envelope rappresentano il modo più semplice e affidabile per individuare le frequenze associate ai difetti del cuscinetto (vedi Figura 9).

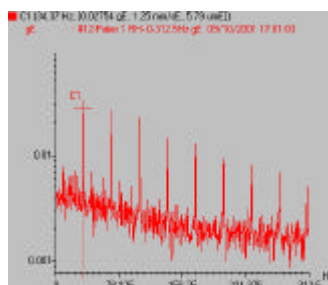


Figure 9: Spettro envelope e frequenza del difetto del cuscinetto.

Lo spettro envelope tuttavia non evidenzia la relazione tra gli shocks periodici e l'ampiezza della modulazione.

Una corretta selezione dell'area filtrata è determinante ai fini del risultato dell'envelope.

Attenzione: Se il difetto risulta evidente nello spettro envelope esso sarà presente anche nello spettro concatenato, ma non sempre viceversa!

Per le macchine che non hanno frequenze stazionarie ($\dot{A}=3\%$ nel seguente caso pratico) a causa dello scorrimento degli elementi rotanti, il calcolo di envelope non potrà fornire alcuna informazione attendibile.

Il firmware DIVADIAG può monitorare il trend sia per le bande strette che a banda larga nello spettro envelope.

3 Caso pratico

Il presente caso pratico riguarda un cuscinetto a elementi rotanti SKF tipo 6206 avente un importante difetto sulla pista esterna.

Il calcolo della frequenza del difetto sulla pista esterna è dato dalla formula:

$$F_{be} = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right) F_0$$

dove: **a** : angolo di contatto **Z** : numero elementi rotanti
d : diametro elemento rotante **Dm**: diametro primitivo

La frequenza del difetto sulla pista esterna è pari a 3.57 volte la frequenza di rotazione (F_0).

Le condizioni operative del cuscinetto sono:

- Il range di variazione della velocità di rotazione va da 75 rpm (1.25 Hz) a 1440 rpm (24 Hz)
- Il punto di misura è sempre nella stessa posizione e il sensore è fissato con una vite incollata
- Il carico è stazionario durante tutta la misura.

I metodi di misura applicati sono:

- Velocità globale della vibrazione
- Accelerazione globale della vibrazione
- Defect factor
- Kurtosis (3 to 20 kHz)
- Kurtosis (0 to 2000 Hz)
- Kurtosis (0 to 5000 Hz)
- Spettro concatenato.

La misura della velocità globale della vibrazione ha solamente la funzione di fornire un'idea sui fenomeni a media e bassa frequenza eventualmente presenti.

I parametri monitorati vengono correlati alla frequenza di rotazione.

Indicatori globali (accelerazione, velocità e Defect Factor)

Sia il livello della velocità che dell'accelerazione efficace della vibrazione decrescono con la velocità di rotazione della macchina (Figure 10 e 11). L'accelerazione efficace non fornisce informazioni affidabili per valori di rotazione inferiori a 300 rpm.

A causa della suddetta non linearità, i valori delle soglie di severità dei due indicatori dovranno essere definiti per ciascuna velocità di rotazione.

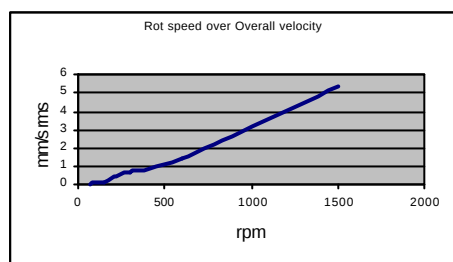


Figura 10: Velocità efficace

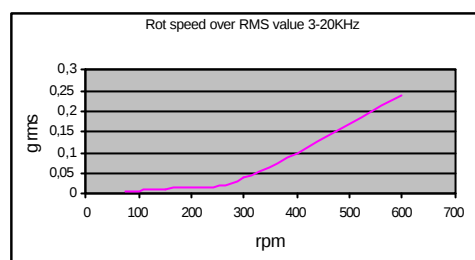


Figura 11: Accelerazione efficace

In Figura 12 si osserva che Il Defect factor è più stabile dei parametri globali per velocità di rotazione maggiori di 400 rpm.. Normalmente la soglia di allarme è fissata a 6 per i motori, pompe e ventilatori. Per velocità inferiori a 400 rpm il parametro Defect factor non è affidabile.

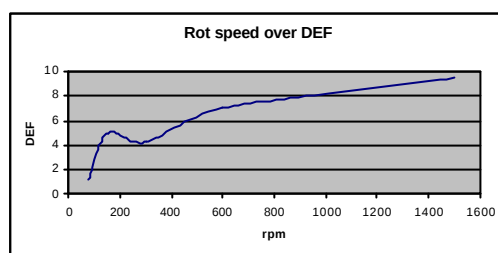


Figura 12: Defect factor

Analisi di KURTOSIS

Il valore del parametro KURTOSIS è stato calcolato per diversi range di frequenza. L'indicatore KURTOSIS deve essere fissato caso per caso per ottimizzarne l'efficacia.

Di norma il range di frequenza per il calcolo del parametro viene scelto nel range di alta frequenza analogamente al metodo envelope.

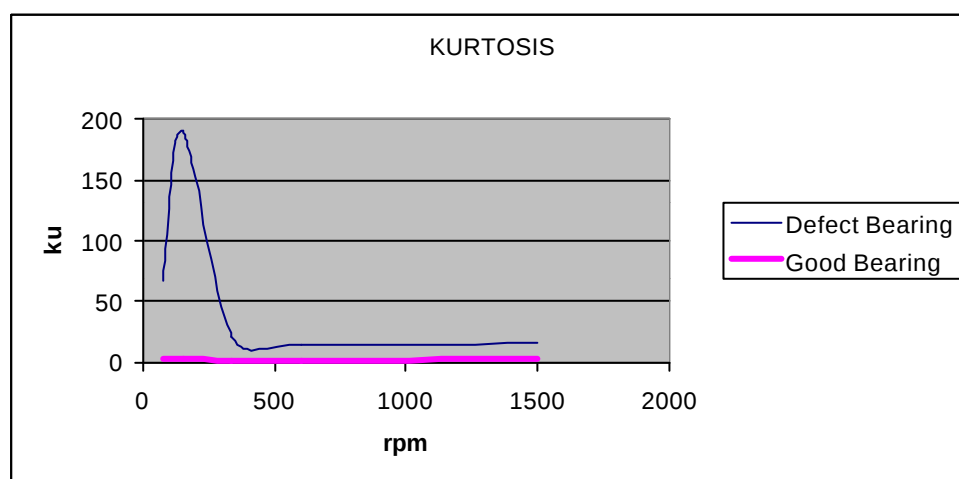


Figura 13: range KURTOSIS da 3 a 20kHz

Analogamente alle analisi di spettro envelope, la selezione del range di frequenza per il calcolo del parametro KURTOSIS è di estrema importanza (le risposte del cuscinetto eccitato dagli shocks periodici interni sono localizzate ad alta frequenza).

Nella Figura 13 il livello di KURTOSIS è molto elevato in presenza di un difetto sul cuscinetto (valore da 16 a 190); anche per velocità di rotazione molto basse raggiunge un valore di 190 (mentre il valore rms è modesto) ed è ancora significativo anche quando i valori dei parametri globali e del Defect Factor non sono più affidabili.

Per un cuscinetto in buone condizioni operative il valore di KURTOSIS è stabile (p.es. 2.5 come in Figura 13) per tutte le velocità di rotazione.

Normalmente la risposta del cuscinetto a diversi livelli di eccitazione non è stabile e il valore di KUTOSIS può fluttuare ampiamente. Sfortunatamente le analisi di KURTOSIS effettuate sul cuscinetto di una scatola ad ingranaggi sono inquinate dagli shocks periodici indotti dagli ingranaggi.

L'analisi del parametro KURTOSIS è disponibile sul collettore dati MOVIOLOG2 e sui prodotti on line.

4 Conclusioni

Gli strumenti di monitoraggio dei cuscinetti a elementi rotanti danno risultati affidabili quando vengono usati in modo corretto. La buona conoscenza della tecnologia costruttiva dei cuscinetti è un elemento di cruciale importanza per garantire diagnosi sicure.

Le analisi di trend concorrono ad ottimizzare le decisioni in materia di manutenzione predittiva.

Le analisi a spot sono più difficili di quelle con monitoraggio periodico e richiedono una adeguata esperienza professionale.

Riassumiamo le caratteristiche più importanti dei metodi di analisi normalmente utilizzati per la diagnosi dei cuscinetti a elementi rotanti:

Livelli globali: Questi indicatori sono facili da utilizzare per il monitoraggio in generale dell'usura dei cuscinetti a rotolamento con velocità di rotazione maggiori di 300 rpm. Le soglie di severità devono essere fissate per ogni velocità di rotazione e per ogni carico.

Defect factor: Questo specifico indicatore, avente una sola scala di valutazione indipendente dalla velocità di rotazione, può essere applicato a motori, pompe e ventilatori. Il Defect Factor mette in evidenza gli effetti delle cricche a fatica e delle usure estese degli elementi rotanti. Esso non è affidabile alle basse velocità di rotazione.

Spettro concatenato: Lo spettro concatenato fornisce tutte le informazioni sulle vibrazioni della macchina. Attraverso la funzione di ricerca automatica delle frequenze dei difetti - cursori armonici e delle bande laterali - è possibile individuare i difetti dei cuscinetti a partire dallo stadio primitivo di evoluzione.

Spettro envelope: Questo specifico metodo di calcolo deve essere effettuato su di una zona di risonanza dello spettro della vibrazione (esso deve operare su di uno spettro a larga banda). Il metodo fornisce buoni risultati per il 90% dei casi analizzati e non lavora correttamente per il restante 10% dei casi a causa di: errato filtraggio dell'area di calcolo, numero insufficiente di shocks in alta frequenza, ecc..

KURTOSIS: Questo indicatore statistico è adatto per l'analisi delle difettosità a basse velocità di rotazione. Ma le macchine non devono essere sede di shocks continui o transienti (ingranaggi di forni rotanti, riduttori per cicli pesanti, ecc.). Normalmente questo indicatore deve essere usato con valori globali rms e segnali temporali.

Metodi indiretti

L'analisi delle scatole ingranaggi, attraverso l'elaborazione delle frequenze di ingranamento, può fornire informazioni complementari sui meccanismi di usura dei cuscinetti. In particolare, attorno alla frequenza di ingranamento, si manifestano le componenti della modulazione soprattutto quando il gioco del cuscinetto diventa importante. I risultati delle diagnosi migliorano quando si prende in considerazione la struttura meccanica nella sua interezza.

Trasduttori specifici

I traduttori accelerometrici presentano alcune limitazioni alle basse frequenze di rotazione, in questi casi l'uso di un sensore di prossimità potrebbe essere più vantaggioso.

Analisi Olio

Per i cuscinetti a elementi rotanti sotto lubrificazione viene spesso effettuata l'analisi dell'olio per ottenere informazioni complementari sui processi di usura.

01dB-Stell è disponibile a fornire le migliori soluzioni tecnico-economiche per l'analisi di tutti i tipi di cuscinetti a elementi rotanti attraverso tecniche di monitoraggio on line e off line.

§ § § § § §