



# ANALISI DELLE VIBRAZIONI PER LA DIAGNOSTICA DELLE MACCHINE ROTANTI – 3° parte

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Università di Pavia  
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

## Indice

- ☀ Cuscinetti a rotolamento (o volventi)
- ☀ Cuscinetti radiali e assiali
- ☀ Danni primari e secondari nei cuscinetti a rotolamento
- ☀ Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento
- ☀ Analisi delle vibrazioni e di altri parametri per individuare i guasti nei cuscinetti a rotolamento
  - ☀ Applicazione "pratica": diagnostica dei cuscinetti a rotolamento nei motori asincroni con l'uso della corrente di statore e del rendimento
- ☀ Cuscinetti a strisciamento (o radenti)

2

L. Frosini

## Cuscinetti (*bearings*)

I cuscinetti sono componenti meccanici che fungono da supporto per componenti rotanti, come gli alberi delle macchine rotanti (elettriche o meno).

Il carico trasmesso dal componente supportato (rotore) si trasferisce all'esterno attraverso elementi in contatto di **rotolamento** oppure di **strisciamento**, da cui prendono il nome i rispettivi tipi di cuscinetto:

- **cuscinetti a rotolamento o volventi** (*rolling bearings*);
- **cuscinetti a strisciamento o radenti** (*plain bearings*).

Per la fabbricazione dei cuscinetti si utilizzano materiali di elevata durezza e resistenza, generalmente acciai.

3

L. Frosini

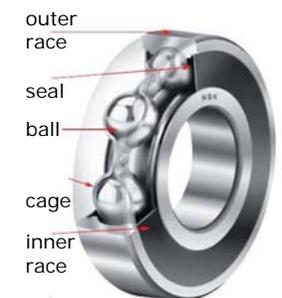
## Cuscinetti a rotolamento o volventi (*rolling bearings*)

La maggior parte delle macchine elettriche rotanti (escluse quelle di grossa taglia o per applicazioni particolari) impiega cuscinetti a rotolamento che consistono in:

- un anello esterno (*outer race* o *outer ring*),
- un anello interno (*inner race* o *inner ring*),
- una gabbia (*cage*),
- insieme di corpi volventi: sfere (*ball*) o rullini (*roll*).

Generalmente l'anello interno ruota e quello esterno è fermo, ma si può avere anche la soluzione opposta.

I corpi volventi possono essere lubrificati con grasso o olio.



4

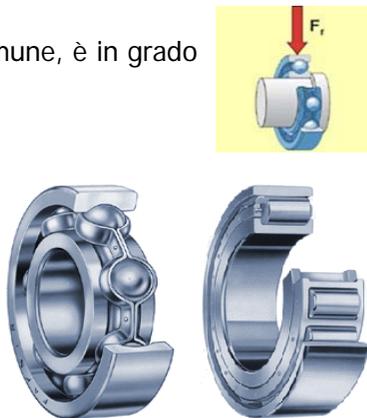
## Cuscinetti a sfere e a rullini

Questo tipo di cuscinetto, nella sua forma più comune, è in grado di sostenere carichi in direzione radiale.

Il contatto ideale tra un rullino e la guida è una linea, mentre il contatto tra una sfera e la guida è un punto.

Quindi la capacità di supportare carichi radiali dei comuni cuscinetti a rullini (*cylindrical roller bearings*) è superiore a quella dei comuni cuscinetti a sfere (*deep groove ball bearings*).

I cuscinetti a sfere presentano, come vantaggio, un attrito più basso rispetto a quelli a rullini e quindi possono essere impiegati efficacemente ad elevate velocità e con carichi moderati. Sono i più usati nei motori elettrici, anche grazie al basso rumore, conseguente al basso attrito, e al basso costo.



5

## Carichi radiali e assiali

Nei motori ad asse orizzontale il carico è prevalentemente radiale (anche se è sempre presente una componente assiale), per cui è sufficiente utilizzare i comuni cuscinetti a sfere o a rullini.

Per carichi assiali non eccessivi (ad es. motori ad asse verticale di piccola taglia, che trascinano utilizzatori non troppo pesanti), possono essere ancora sufficienti i comuni cuscinetti a sfera.

In alternativa, si impiegano cuscinetti obliqui a sfere (*angular contact ball bearings*), che hanno le piste dell'anello interno e dell'anello esterno spostate l'una rispetto all'altra, in modo da supportare carichi obliqui (combinazioni di carichi radiali e assiali).

La capacità dei cuscinetti obliqui a sfere di supportare carichi assiali aumenta proporzionalmente all'aumentare dell'angolo di contatto  $\alpha$ .



6

## Carichi radiali e assiali

L'angolo di contatto  $\alpha$  è definito come l'angolo fra la linea che congiunge i punti di contatto fra sfera e piste sul piano radiale, lungo la quale il carico viene trasmesso da una pista all'altra, e una linea perpendicolare all'asse del cuscinetto

Nel caso di carichi assiali più pesanti, è invece necessario utilizzare cuscinetti a rulli conici o cuscinetti assiali.

I cuscinetti a rulli conici sono dotati di piste coniche negli anelli interno ed esterno, fra le quali sono disposti i rulli. Essi sono particolarmente adatti a sostenere carichi combinati radiali e assiali (es. nei riduttori per la trazione).



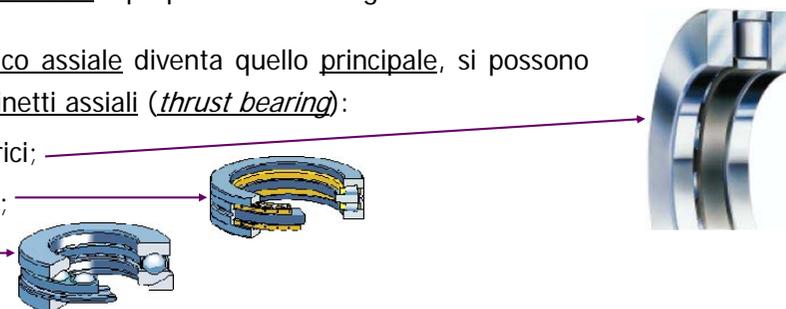
7

## Carichi radiali e assiali

Come per i cuscinetti obliqui a sfere, anche la capacità di carico assiale dei cuscinetti a rulli conici è proporzionale all'angolo di contatto.

Quando il carico assiale diventa quello principale, si possono utilizzare cuscinetti assiali (*thrust bearing*):

- a rulli cilindrici;
- a rulli conici;
- a sfere.



Per reggere carichi radiali in aggiunta ai carichi assiali si possono utilizzare:

- cuscinetti assiali obliqui a sfere;
- cuscinetti assiali orientabili a rulli.



8

## Protezione e lubrificazione dei cuscinetti

Dal punto di vista della protezione delle parti interne del cuscinetto dagli agenti esterni, si possono avere sostanzialmente tre tipi di esecuzione:

- ✚ **Aperti**, dove le parti volventi sono esposte all'ambiente esterno. Non è consigliabile usarli in ambienti gravosi, con presenza di polvere, umidità o fluidi corrosivi;
- ✚ **Schermati (con schermi: *shields*)**, dove le parti volventi sono protette da una coppia di sottili flange metalliche. Questo tipo di protezione è efficace contro la polvere;
- ✚ **Stagni (con tenute: *seals*)**, dove le parti volventi sono protette da una coppia di sottili flange di gomma, a tenuta stagna. Questo tipo di protezione è efficace sia contro la polvere sia contro i fluidi. In questo caso, il necessario lubrificante, sufficiente per l'intera vita del cuscinetto, è inserito dal costruttore in fase di assemblaggio (cuscinetti lubrificati a vita).

9

## Danni nei cuscinetti a rotolamento

Esamineremo nel seguito le diverse cause che possono provocare guasti nei cuscinetti a rotolamento.

Ciascuna causa produce uno o più tipi di danno, che possono essere definiti primari, i quali possono indurre a loro volta danni secondari.

### Danni primari:

- A) Usura (*wear*);
- B) Dentellatura (*indentations*);
- C) Incisioni, scalfitture (*smearing*);
- D) Piccole cricche superficiali (*surface distress*);
- E) Corrosione;
- F) Danni da corrente elettrica.

### Danni secondari:

- a) Sfaldatura (*flaking* o *spalling*);
- b) Cricche (*cracks*);
- c) Danni alla gabbia.

Si noti che esistono anche altri tipi di classificazione dei danni ai cuscinetti, che comunque comprendono sempre quelli qui indicati.

10

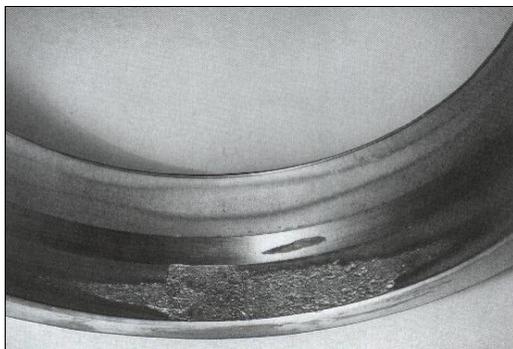
## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

- 1) Normale deterioramento dovuto a fatica.



Danno:

Sfaldatura (*flaking* o *spalling*).



11

## Processo che porta alla sfaldatura

L'area di contatto di un elemento rotolante è idealmente nulla (un punto o una linea).

In realtà, quando il cuscinetto è caricato, la deformazione è inevitabile.

Nelle condizioni operative normali questa deformazione porta a fatica il materiale di contatto.

Il periodo che precede l'apparizione del primo segno di fatica è funzione del numero di giri eseguiti dal cuscinetto e dall'entità del carico.

La fatica è il risultato di sforzi tangenziali (*shear stresses*) che ciclicamente appaiono immediatamente al di sotto della superficie portante del carico.

Dopo un po' di tempo, questi sforzi provocano cricche (*cracks*) che gradualmente si estendono a tutta la superficie.

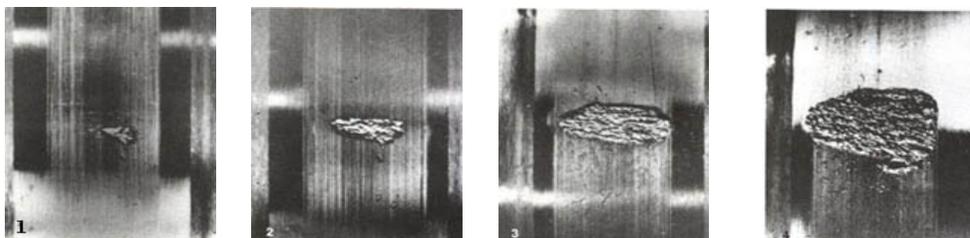
12

## Sfaldatura

Quando i corpi volventi passano sulle cricche, frammenti di materiale si staccano: questo fenomeno prende il nome di sfaldatura (*flaking* o *spalling*).

La sfaldatura aumenta col tempo e può rendere il cuscinetto inutilizzabile.

La figura mostra il graduale prodursi della sfaldatura.



13

## Sfaldatura

La **vita** di un cuscinetto è definita come il numero di giri (o il numero di ore operative ad una determinata velocità) che il cuscinetto può eseguire prima che inizi a prodursi una sfaldatura.

Questo non significa che il cuscinetto non possa essere usato dopo l'inizio della sfaldatura: la sfaldatura è un processo relativamente lungo e la sua presenza è evidenziata da un aumento dei livelli di vibrazione e rumore del cuscinetto. Questo dà la possibilità di pianificare la sostituzione del cuscinetto.

Poiché cuscinetti apparentemente identici operanti in condizioni identiche hanno diverse durate di vita, il concetto di vita nominale è relativo alla vita raggiunta (o superata) dal 90% di un sufficientemente ampio gruppo di cuscinetti apparentemente identici, operanti in condizioni identiche, in termini di: allineamento, carico applicato centrato assialmente, velocità, accelerazione, lubrificazione, temperatura e pulizia.

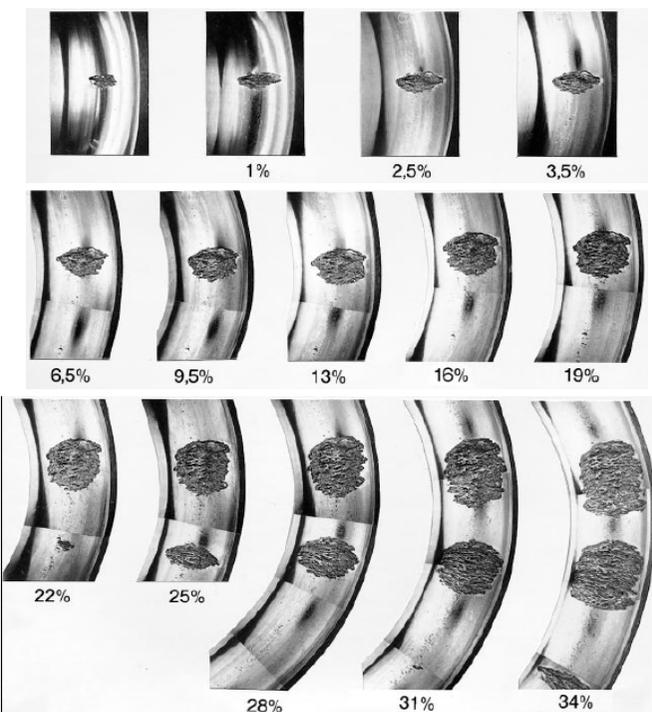
14

## Sfaldatura

Sviluppo del danno dovuto a fatica nell'anello interno di un cuscinetto a sfere.

Gli intervalli periodici tra le diverse ispezioni sono dati in percentuale rispetto alla "vita nominale"  $L_{10}$ .

Per cuscinetti operanti a velocità costanti, la vita nominale si esprime in ore (piuttosto che in giri) di funzionamento con un carico dinamico di base (ad es., 16000 ore).



15

## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

2) Particelle abrasive (impurità) dovute a:

- contaminazione durante l'installazione;
- difetti nelle tenute;
- contaminazione del lubrificante.



Danno:

- usura (*wear*) delle superfici di contatto;
- dentellatura (*indentation*).



Anello esterno di un cuscinetto a sfere con le guide usurate da particelle abrasive



Dentellatura causata da impurità in una delle guide di un cuscinetto a rullini.



16

## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

### 3) Difetto del film lubrificante:

- lubrificante inadeguato (scarsa lubrificazione);
- lubrificante improprio.

#### ➔ Danno:

- ✓ piccole cricche superficiali (*surface distress*), da non confondere con le cricche vere e proprie (*cracks*) provocate da fatica;
- ✓ incisioni, scalfitture (*smearing*), che possono a loro volta provocare cricche vere e proprie e sfaldatura.



7

## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

### 4) Acqua o altri liquidi corrosivi all'interno del cuscinetto (*moisture corrosion*).

Danno primario: corrosione.



Danni secondari: sfaldatura o cricche.



Nota: si parla di corrosione anche nel caso di sfregamento, ossia di micro-movimenti, tra due superfici caricate (*fretting corrosion*).

18

## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

### 5) Correnti nei cuscinetti (*bearing currents, electrical erosion*).

#### ➔ Danno: increspatura (*fluting*).

Quando una corrente passa attraverso un cuscinetto, ossia da un anello all'altro attraverso i corpi volventi e il lubrificante, si ha un effetto simile a quello della saldatura elettrica ad arco, con temperature molto elevate e circoscritte: il metallo si riscalda a temperature che vanno dai livelli di tempra (*tempering*) a quelli di fusione (*melting*).

Nelle piste e nei rullini si ha un effetto di increspatura (*fluting*) e si possono verificare bruciature localizzate, mentre nelle sfere si ha un effetto di cambiamento di colore, dovuto alla formazione di micro-crateri.

La sfera a sinistra presenta una superficie con molti micro-crateri formati per il passaggio della corrente. A destra è riportata una sfera non danneggiata per il confronto.



19

## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

In generale, è difficile distinguere visivamente un danno dei cuscinetti provocato da una corrente elettrica da quello provocato dalle vibrazioni.

Nel caso di danno provocato da corrente elettrica, l'increspatura presenta un colore più scuro, mentre nel caso di danno provocato da vibrazioni l'increspatura è più chiara o arrugginita.

Un'altra differenza è che i corpi volventi non risultano danneggiati nel caso di *fluting* provocato da vibrazioni.

I danni possono essere causati da correnti sia alternate che continue, anche di piccola intensità.

I cuscinetti fermi sono più resistenti al danno provocato dalla corrente elettrica rispetto ai cuscinetti in rotazione.

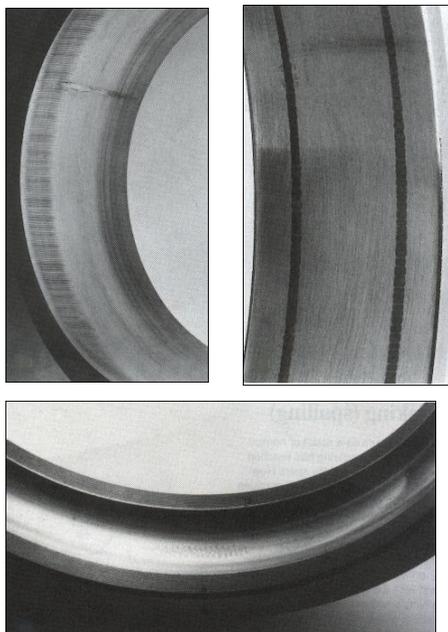
L'estensione del danno dipende da: intensità di corrente, durata, carico dei cuscinetti, velocità, tipo di lubrificante.

20

## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

Immagine di *fluting* provocato dal passaggio di corrente elettrica negli anelli esterni di cuscinetti a sfere.

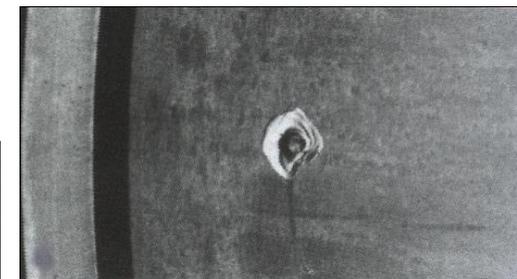
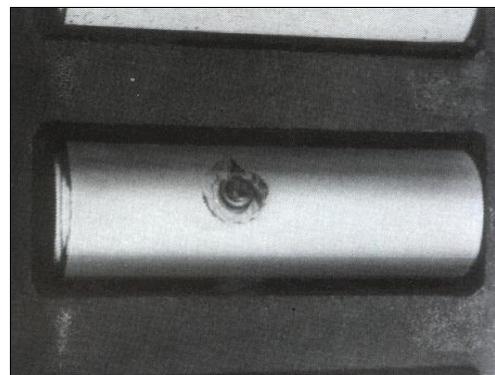
Si noti che spesso il *fluting* non causa un guasto immediato ma ha un effetto secondario per cui il difetto nell'anello esterno può andare ad eccitare una frequenza naturale del sistema.



21

## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

Altri danni provocati dal passaggio di corrente elettrica in cuscinetti a rullini.

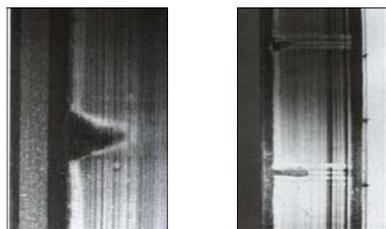


22

## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

6) Errata pressione di montaggio.

➔ Danno primario: dentellatura.



➔ Danno secondario: sfaldatura.

La figura mostra la sfaldatura dovuta a un errato montaggio. La forza di montaggio, trasmessa alle sfere, ha provocato la formazione di dentellature sulle piste, producendo la sfaldatura.



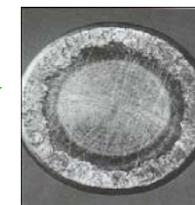
23

## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

7) Sovraccarico meccanico.

➔ Danno:

- ✓ incisioni, scalfitture (*smearing*), specie se il carico è assiale e se è anche presente una cattiva lubrificazione;
- ✓ dentellature, se il sovraccarico è su cuscinetti fermi.



In aggiunta a un reale sovraccarico, si può avere un sovraccarico dovuto a un disallineamento o a uno sbilanciamento del rotore.

Altre cause di guasto possono essere urti meccanici, surriscaldamento.

24

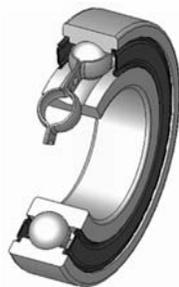
## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

Un danno alla gabbia del cuscinetto è da considerare come un danno secondario: usualmente anche altri componenti del cuscinetto si sono danneggiati ed è difficile accertare la causa del guasto.

Le principali cause possono essere: vibrazioni, velocità eccessiva, usura, ostacoli (*blockage*).

**Vibrazioni:** quando il cuscinetto è esposto a vibrazioni, le forze d'inerzia possono provocare cricche dovute a fatica nella gabbia, che possono portare a fratture della gabbia stessa.

**Velocità eccessiva:** se il cuscinetto ruota a velocità superiori a quelle per cui è stato progettato, la gabbia è sottoposta a notevoli forze d'inerzia che possono portare a fratture. Per elevate velocità, si impiegano gabbie appositamente progettate.



25

## Cause di guasto nei cuscinetti a rotolamento

**Usura:** l'usura della gabbia può derivare da una lubrificazione inadeguata o dalla presenza di particelle abrasive. Infatti, la gabbia è soggetta a strisciamento con gli altri componenti del cuscinetto, per cui è il primo componente a soffrire nel caso di lubrificazione inadeguata. Inoltre la gabbia è costituita da materiale più tenero rispetto agli altri componenti e di conseguenza si usura più velocemente.

**Ostacoli (*blockage*):** frammenti di materiale sfaldato o altre particelle possono incunarsi tra la gabbia e i corpi volventi, impedendo a questi di ruotare. Questo può portare a rottura della gabbia.

Altre cause: un disallineamento tra gli anelli di un cuscinetto che fa sì che le sfere non seguano il loro normale percorso con conseguenti sforzi sulla gabbia; accelerazioni, decelerazioni e fluttuazioni della velocità provocano notevoli forze d'inerzia sulla gabbia, con conseguente usura.

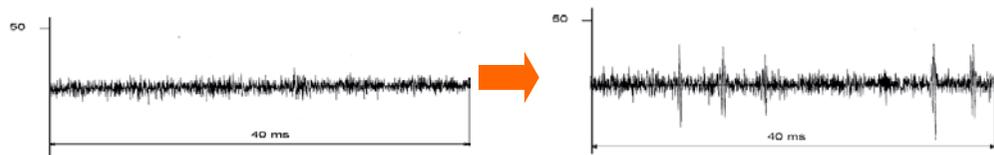
26

## Sintomi dei danni nei cuscinetti a rotolamento

I sintomi dei danni nei cuscinetti a rotolamento sono:

- irregolare corsa (*uneven running*),
- ridotta accuratezza di funzionamento,
- rumore inusuale durante la corsa.

In generale, un guasto dei cuscinetti provoca un aumento del livello complessivo della vibrazione e un aumento del livello di componenti della vibrazione a frequenze specifiche.



Vibrazione nel tempo di un cuscinetto sano

Vibrazione nel tempo di un cuscinetto guasto

27

## Guasti ciclici e non ciclici

I guasti dei cuscinetti possono essere suddivisi in:

- ✚ guasti ciclici: difetti localizzati che producono vibrazioni cicliche;
- ✚ guasti non ciclici: difetti non localizzati.

La sfaldatura in un anello o in un corpo volvente è usualmente un guasto ciclico.

La corrosione invece non è un difetto localizzato per cui produce un guasto non ciclico, ossia vibrazioni con contenuto di frequenze molto ricco e non stazionario.

Anche l'increspatura (*fluting*) provocata dalle correnti elettriche produce vibrazioni non cicliche.

28

## Analisi delle vibrazioni

La diagnostica dei cuscinetti a rotolamento è generalmente effettuata rilevando le vibrazioni della cassa del cuscinetto attraverso un accelerometro.

Un primo metodo utilizzato per individuare i guasti dei cuscinetti è il monitoraggio del livello complessivo della vibrazione.

Esiste una norma ISO che definisce diverse classi sulla base del livello complessivo della vibrazione (buona, permessa, appena tollerata e non permessa).

Tuttavia il metodo più efficace per utilizzare questa tecnica consiste nel monitorare la tendenza del livello complessivo della vibrazione nel tempo: un suo aumento è indicatore del deterioramento del cuscinetto.

Il monitoraggio del livello complessivo della vibrazione (*overall vibration level*) è utile per rilevare guasti non ciclici, ma può non essere sufficiente per individuare guasti incipienti.

29

## Analisi delle vibrazioni per guasti ciclici

I guasti ciclici, che si possono verificare nell'anello interno, nell'anello esterno, nei corpi volventi o nella gabbia, producono componenti della vibrazione a frequenze specifiche.

Queste frequenze sono funzione della geometria dei cuscinetti e della velocità di rotazione.

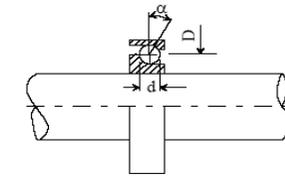


Fig. 3-1. Geometry of an angular contact ball bearing.

30

## Analisi delle vibrazioni per guasti ciclici

Un difetto nell'anello esterno causa un impulso quando il corpo volvente passa davanti all'area difettosa dell'anello.

La frequenza teorica da monitorare nello spettro delle vibrazioni per individuare questo guasto è:

$$f_o = \frac{N}{2} f_r \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

Dove  $f_r$  è la frequenza di rotazione,  $N$  è il numero di corpi volventi,  $d$  è il diametro del corpo volvente,  $D$  il diametro della circonferenza media del cuscinetto,  $\alpha$  è l'angolo di contatto del corpo volvente con le guide.

31

## Analisi delle vibrazioni per guasti ciclici

La frequenza teorica da monitorare nello spettro delle vibrazioni per individuare un difetto nell'anello interno è:

$$f_i = \frac{N}{2} f_r \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

Per un difetto nei corpi volventi:

$$f_b = \frac{D}{2d} f_r \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \alpha \right)$$

Per un difetto nella gabbia:

$$f_c = \frac{1}{2} f_r \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

32

## Analisi delle vibrazioni per guasti ciclici

Le frequenze indicate nelle equazioni precedenti sono valide per un cuscinetto ideale. In realtà, i corpi volventi non rotolano solamente nelle guide, ma strisciano anche. Questo fatto può essere tenuto in conto con un fattore di strisciamento che usualmente assume valori tra 0,8 e 1.

Spesso nella pratica le equazioni precedenti sono sostituite da equazioni approssimate.

Per un difetto nell'anello esterno:

$$f_o = 0,4 \cdot N \cdot f_r$$

Per un difetto nell'anello interno:

$$f_i = 0,6 \cdot N \cdot f_r$$

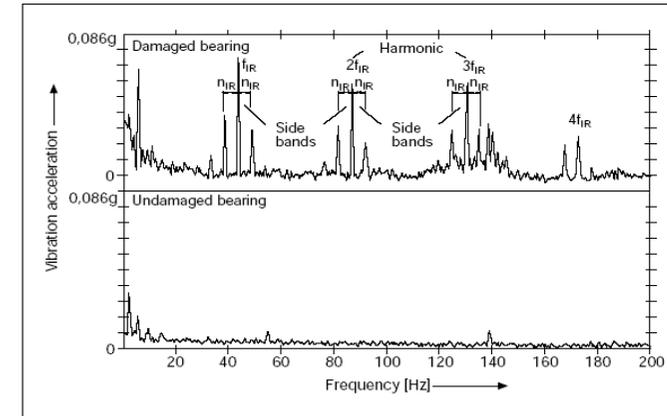
In questo modo le frequenze possono essere facilmente calcolate anche senza conoscere le caratteristiche geometriche del cuscinetto.

33

## Analisi delle vibrazioni per guasti ciclici

Esempio di analisi delle vibrazioni nel dominio delle frequenze:

- 5: Frequency spectrum of envelope signal between 0 and 200 Hz, below: undamaged bearing; above: damaged bearing  
 $n_{IR}$  Inner ring speed [ $\text{min}^{-1}$ ]  
 $f_{IR}$  Frequency of inner ring signal (cyclng frequency) [Hz]



34

## Analisi delle vibrazioni per guasti ciclici

Quando il grado di danno è piccolo, l'ampiezza delle componenti sopra citate si "perde" nel rumore di fondo della vibrazione.

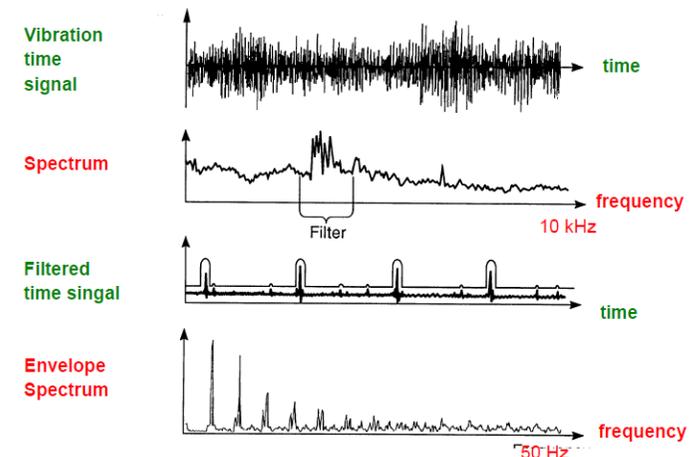
Tuttavia, una volta calcolate le frequenze caratteristiche, è possibile migliorare le prestazioni dello strumento diagnostico usando filtri selettivi e funzioni pesate, in modo da riuscire a identificare i guasti anche in uno stadio precoce.

Quando una macchina presenta anche un grado di sbilanciamento, questo tende a modulare le frequenze caratteristiche delle vibrazioni dei cuscinetti producendo delle bande laterali alla frequenza di rotazione.

35

## Analisi delle vibrazioni: *envelope spectrum*

Un metodo che permette di individuare guasti incipienti nei cuscinetti è noto come *envelope spectrum* e consiste nel filtrare il segnale della vibrazione in una banda ristretta e quindi nel calcolare lo spettro del segnale filtrato.



36

## Analisi delle correnti di statore

La relazione tra lo spettro delle vibrazioni dei cuscinetti e quello della corrente di statore di un motore asincrono può essere determinata ricordando che ogni tipo di eccentricità al traferro produce un'anomalia nella densità di flusso al traferro. Questa, a sua volta, influenza le induttanze della macchina che determinano le armoniche della corrente di statore.

Poiché i cuscinetti a sfera supportano il rotore, qualsiasi difetto dei cuscinetti produrrà uno spostamento radiale tra rotore e statore.

Questo movimento genera correnti di statore a frequenze prevedibili  $f_p$ :

$$f_p = |f_s \pm kf_v|$$

dove  $f_s$  è la frequenza di alimentazione elettrica,  $f_v$  è una delle caratteristiche frequenze di vibrazione e  $k = 1, 2, 3, \dots$

37

## Analisi degli Shock Pulse

Un altro metodo utilizzato per il monitoraggio dei cuscinetti a rotolamento è lo Shock Pulse Method (tecnica brevettata), che permette di misurare, con un accelerometro piezo-elettrico, l'impatto iniziale tra l'elemento rotolante e la superficie del cuscinetto, che si sviluppa a frequenze nella banda dell'ultrasuono (32 kHz).

Nel corso della loro vita utile, i cuscinetti generano shock nell'interfaccia tra l'elemento rotolante e la pista. Questi shock "colpiscono" il trasduttore SPM, che emette impulsi elettrici proporzionali all'intensità dello shock stesso.

A differenza dei trasduttori di vibrazione, il trasduttore di shock pulse risponde a una frequenza di risonanza, accuratamente regolata a 32 kHz, permettendo così una misura calibrata dell'ampiezza degli *shock pulse*.

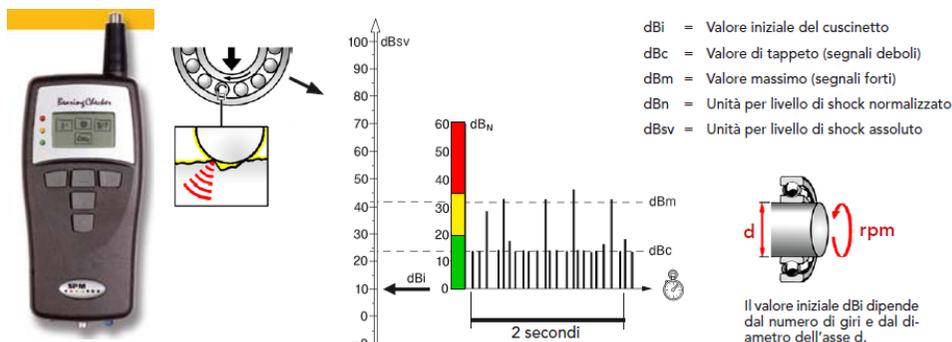
Questa misura ha il vantaggio di non essere influenzata da altri fattori, come la vibrazione di fondo o il rumore.

<http://www.spminstrument.com>

38

## Analisi degli Shock Pulse

L'ampiezza di questi *shock pulse* dipende dalle condizioni delle superfici del cuscinetto e dalla velocità periferica del cuscinetto (a sua volta dipendente dalla velocità angolare del rotore e dalla geometria del cuscinetto). Il trasduttore converte gli *shock* in segnali elettrici, che vengono elaborati al fine di ricavare un valore "tappeto" (*carpet value*) e un valore di picco (*max value*).



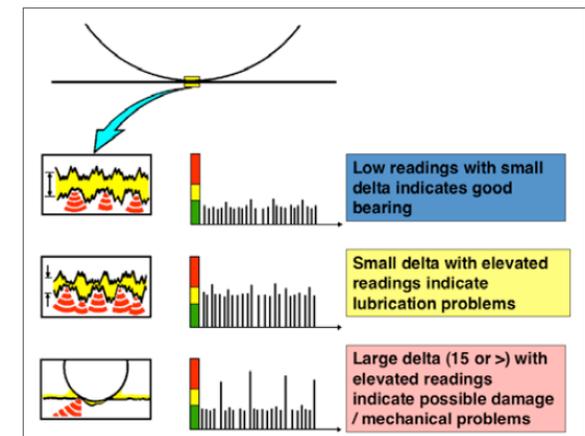
<http://www.spminstrument.it/>

39

## Analisi degli Shock Pulse

Il *carpet value* è indicativo delle condizioni della lubrificazione: aumenta al diminuire dello spessore del velo lubrificante, il quale a sua volta dipende dall'apporto di lubrificante, dall'allineamento e dal precarico.

Il valore di picco è invece indicativo delle condizioni meccaniche delle superfici del cuscinetto (ruvidezza, sollecitazioni, danneggiamenti, distacco di particelle metalliche), quindi generalmente di un danno vero e proprio.



L. E. Morando, "Measuring Shock Pulse - Another approach to Front Line Condition Monitoring", ME maintenance & asset management, vol 23, no 6., Nov/Dec 2008.

40

## Nuove tecnologie

Una nuova tecnologia, ancora in fase sperimentale, permette un monitoraggio completo del cuscinetto con un sistema wireless installato all'interno del cuscinetto stesso, che consente di misurare e monitorare:

- velocità,
- carico,
- temperatura,
- vibrazione.



Sistema SKF Insight

<http://www.skf.com/>

41

## Applicazione "pratica": diagnostica dei cuscinetti nei motori asincroni con l'uso della corrente di statore e del rendimento

L. Frosini and E. Bassi, "Stator current and motor efficiency as indicators for different types of Bearing Faults in Induction Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, N. 1, January 2010, pp. 244-251.

42

## I guasti analizzati

Guasto #1



- Cricca sull'anello esterno
- Guasto ciclico
- Usura da fatica

Guasto #2



- Foro sull'anello esterno
- Guasto ciclico

Guasto #3



- Deformazione protezione laterale
- Guasto ciclico
- Errato montaggio

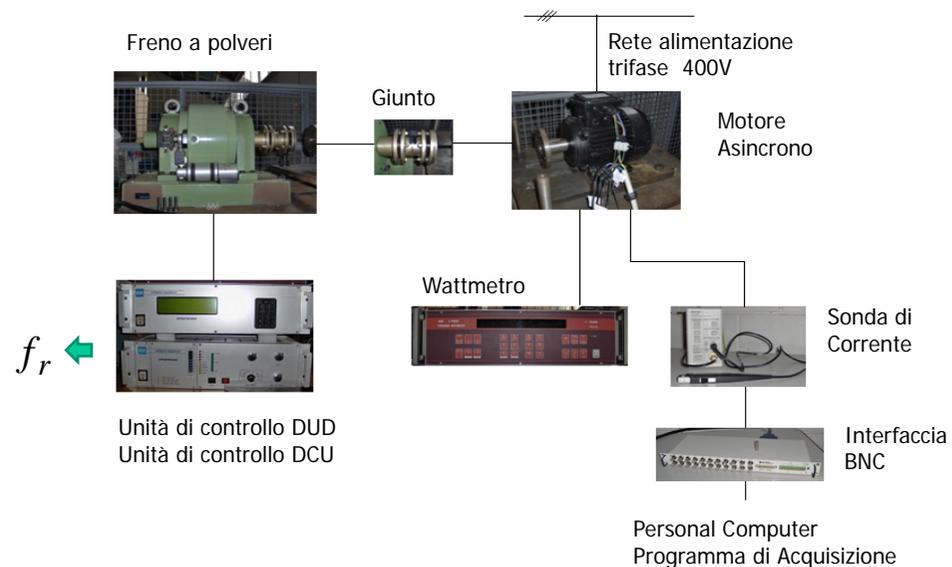
Guasto #4



- Corrosione
- Guasto non ciclico
- Ambiente umido

43

## Banco prova



44

## Analisi delle correnti di statore

Potenza nominale	2.2 kW
Numero poli	2
Tensione alimentazione	400 V
Frequenza alimentazione	50 Hz
Numero cave statore	24
Numero barre rotore	18
Spessore traferro	0.5 mm

I cuscinetti sono a sfera, tipo NSK 6205Z, con 9 sfere, lubrificati con grasso.



Le frequenze prevedibili per i guasti #1 e #2 (guasti ciclici nell'anello esterno) nello spettro di vibrazione ( $f_\rho$ ) e nello spettro di corrente ( $f_p$ ) sono le seguenti.

	A vuoto	Mezzo carico (4 Nm)	Pieno carico (7.5 Nm)
$f_r$	49.7	48.9	47.7
$f_o$	178.8	176.0	171.5
$f_p(k=1)$	228.8	226.0	221.5
$f_p(k=-1)$	128.8	126.0	121.5
$f_p(k=2)$	407.5	402.0	393.1
$f_p(k=-2)$	307.5	302.0	293.1
$f_p(k=3)$	586.3	578.0	564.6
$f_p(k=-3)$	486.3	478.0	464.6
$f_p(k=4)$	765.1	754.1	736.2
$f_p(k=-4)$	665.1	654.1	636.2

45

## Analisi delle correnti di statore

Il metodo qui utilizzato per testare l'efficacia dell'analisi della corrente di statore per l'individuazione dei guasti dei cuscinetti è basato sul confronto sperimentale tra gli spettri della corrente nei casi "sano" e "guasto" e in diverse condizioni di carico (a vuoto, circa a mezzo carico, a pieno carico).

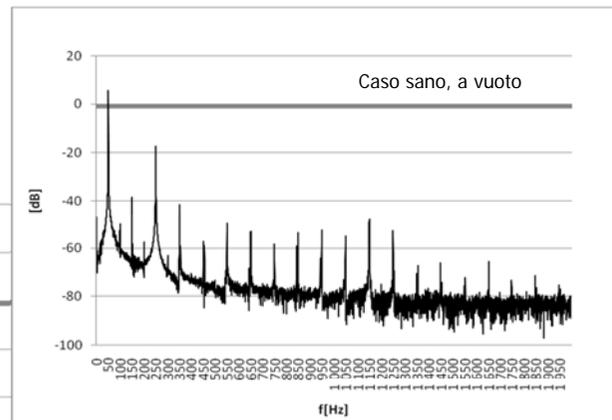
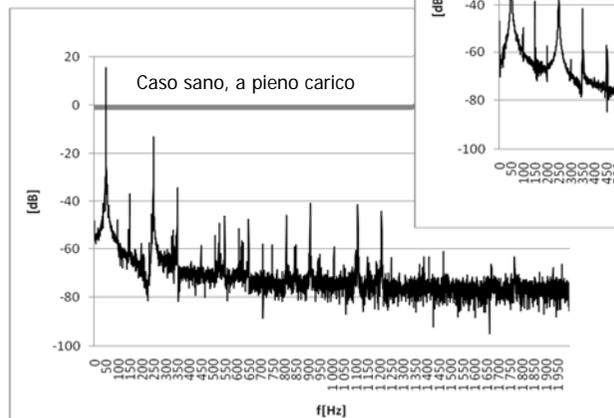
Alcune prove sperimentali sono state condotte dapprima con entrambi i cuscinetti sani, quindi analoghe prove sono state realizzate sullo stesso motore con un cuscinetto danneggiato, secondo i 4 casi prima illustrati.

Per ciascuna prova, sono state eseguite 3 acquisizioni: la corrente è stata misurata con un campionamento di 4000 campioni al secondo, ciascuna acquisizione è durata 2 secondi e lo spettro è stato calcolato come media aritmetica delle 3 acquisizioni.

46

## Cuscinetti "sani", spettro corrente

Tutte le componenti armoniche dispari sono ben definite nella corrente a vuoto anche nel caso "sano".



A pieno carico, lo spettro della corrente nel caso sano presenta un aspetto maggiormente frastagliato rispetto alla condizione a vuoto.

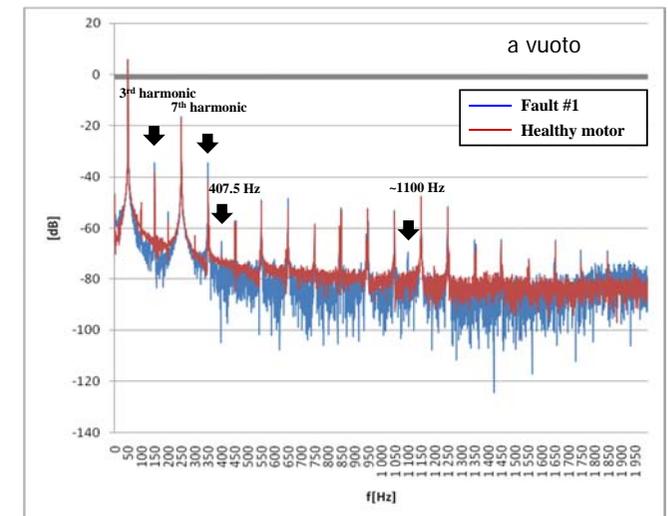
47

## Guasto #1, spettro corrente a vuoto



Le prove col guasto #1 sono caratterizzate da un diverso rumore acustico rispetto alle condizioni "sane", che rivela che questo difetto influenza il funzionamento del motore.

A vuoto, c'è un considerevole aumento nella 3<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> armonica, mentre la fondamentale rimane costante; il valore assoluto di questo aumento corrisponde a circa 10 mA, ossia l'80% del valore delle rispettive armoniche nel caso sano.



48

## Guasto #1, spettro corrente a vuoto



Tra le frequenze prevedibili calcolate nella tabella precedente, solo una appare nelle condizioni di guasto (407,5 Hz).

Un'altra componente è eccitata a circa 1100 Hz.

Questo comportamento è certamente correlato alla presenza del guasto, che produce un'asimmetria nella distribuzione del traferro del motore e quindi influenza le correnti di statore. C'è anche un aumento in altre armoniche dispari, ma questa variazione è piuttosto piccola.

Questi risultati sono diversi da quanto ci si aspettava dalla letteratura e possono essere giustificati dalla presenza di notevoli armoniche di corrente anche in condizioni "sane", che rendono difficile l'identificazione di altre armoniche di debole ampiezza. In ogni caso, la variazione nello spettro della corrente a vuoto causata dal guasto #1 permette di individuare la presenza del difetto, anche se in modo diverso dal previsto.

49

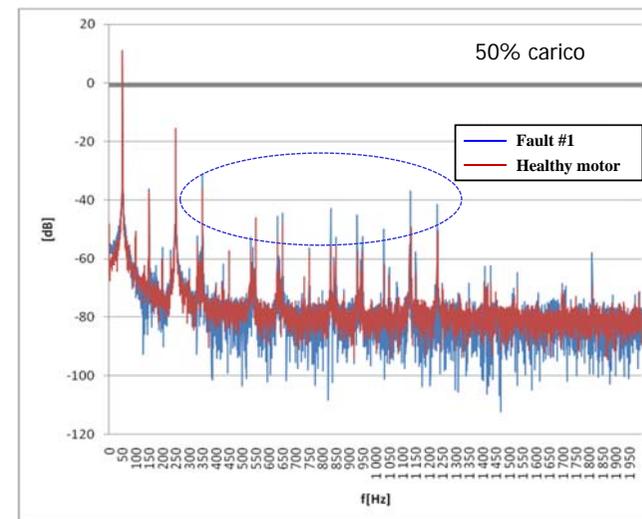
## Guasto #1, spettro corrente a mezzo carico



Nello spettro di corrente a mezzo e a pieno carico, le componenti alle frequenze prevedibili non sono visibili e la 3<sup>a</sup> armonica rimane praticamente costante.

Invece quasi tutte le altre armoniche pari e dispari aumentano. Questo è un segnale della distorsione della corrente causato da un'asimmetria della distribuzione al traferro e quindi può correlato alla presenza di un difetto.

Il problema è verificare se questo effetto può essere prodotto anche da altri tipi di guasto.



50

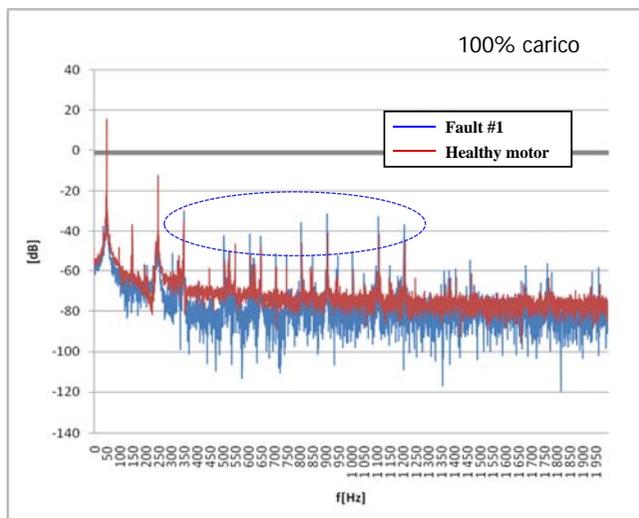
## Guasto #1, spettro corrente a pieno carico



Le differenze tra le prove a vuoto e a carico sono influenzate anche dalla presenza del giunto di accoppiamento.

Questo può aggiungere ulteriori vibrazioni nel funzionamento del motore o smorzare gli effetti dovuti al guasto del cuscinetto.

Quindi, per obiettivi diagnostici, i risultati ottenuti a vuoto sono più affidabili e possono essere considerati come direttamente correlati alla presenza del difetto.



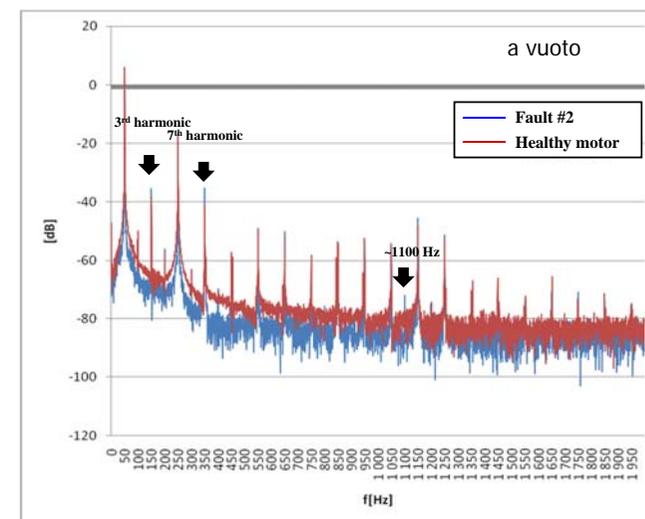
51

## Guasto #2, spettro corrente a vuoto



Il guasto #2 è stato considerato sia per confrontare i risultati sperimentali con altre ricerche, sia per analizzare un guasto che, almeno teoricamente, dà effetti simili al guasto #1.

A vuoto, come per il guasto #1, la 3<sup>a</sup> e la 7<sup>a</sup> armonica aumentano e compare una componente a circa 1100 Hz.

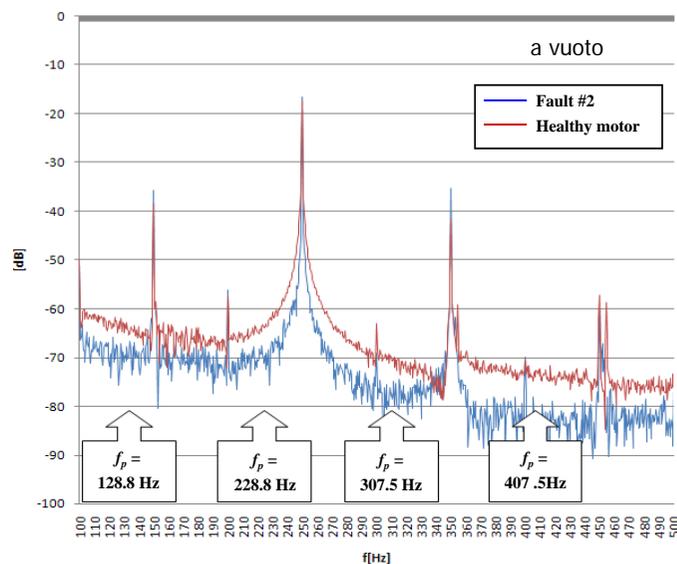


52

## Guasto #2, spettro corrente a vuoto (zoom)



A vuoto, nessuna delle frequenze prevedibili è eccitata dalla condizione di guasto.



53

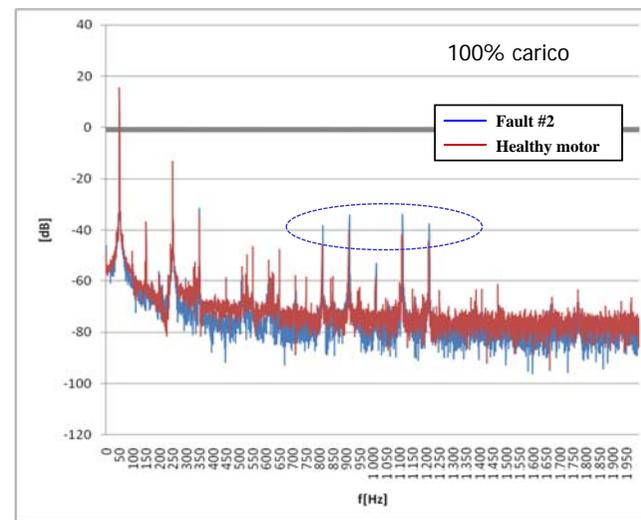
## Guasto #2, spettro corrente a carico



A carico, le prime componenti armoniche dispari sono quasi costanti (con un piccolo aumento solo per la 7<sup>a</sup>).

L'ampiezza delle armoniche pari ad alta frequenza aumenta notevolmente (in particolare: 16<sup>a</sup>, 18<sup>a</sup>, 22<sup>a</sup> e 24<sup>a</sup>).

Quindi per questo guasto i test sperimentali confermano alcuni cambiamenti nello spettro della corrente rispetto al caso sano, anche se questi sono diversi rispetto a quanto riportato in letteratura e variano in funzione del carico del motore.



54

## Guasto #3



Il guasto #3 consiste in una deformazione della protezione laterale (tenuta) del cuscinetto: il suo effetto potrebbe essere considerato ciclico, anche se influenza il comportamento del motore in modo diverso rispetto ai guasti precedenti.

La deformazione non va a toccare le sfere, perché c'è la gabbia interna interposta: il difetto provoca solo uno strisciamento che aumenta l'attrito dinamico nel cuscinetto, ma non causa alcuna variazione del traferro.

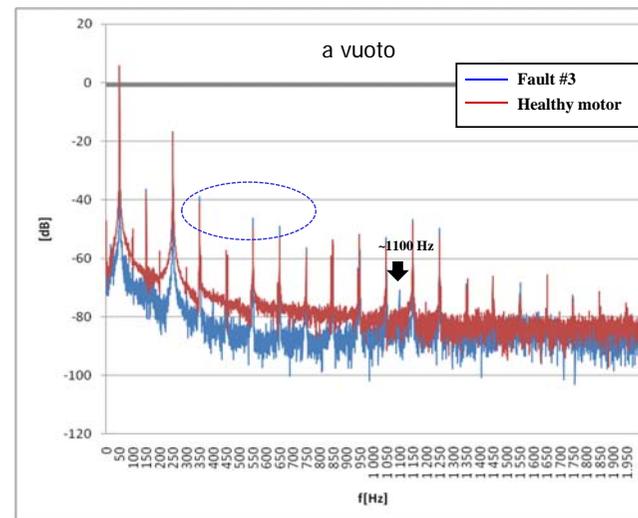
Come nel caso del guasto #1, i test con questo guasto sono caratterizzati un rumore acustico più alto rispetto al caso sano.

55

## Guasto #3, spettro corrente a vuoto



La corrente a vuoto mostra un piccolo aumento nell'ampiezza di alcune armoniche dispari (in particolare: 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>) e una componente eccitata a circa 1100 Hz.

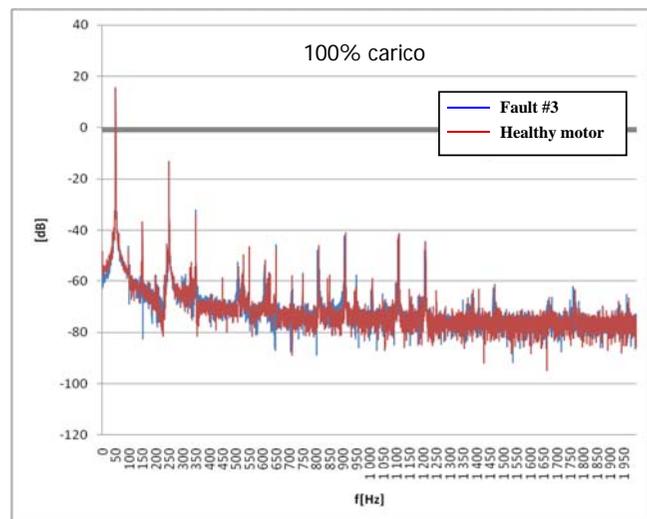


56

## Guasto #3, spettro corrente a carico



I test a carico non forniscono alcuna informazione diagnostica: gli spettri sono praticamente sovrapposti e quasi nessuna componente appare diversa dal profilo nel motore sano.



57

## Guasto #4



Questo guasto è stato realizzato tenendo immerso in acqua un cuscinetto per 3 settimane. Alla fine del trattamento, sono apparsi i primi segni della corrosione degli anelli interno ed esterno. I prodotti della corrosione dovrebbero interferire con le sferette durante la rotazione dell'albero, causando vibrazioni.

Essendo un guasto non ciclico, questo dovrebbe essere più difficile da individuare rispetto ai guasti precedentemente analizzati.

Infatti, un difetto localizzato su una delle piste provoca un'eccitazione impulsiva ad ogni contatto con la sferetta. In questa situazione invece i detriti dovuti alla corrosione si muovono all'interno del cuscinetto, spostati dal passaggio delle sferette; le vibrazioni che ne conseguono sono direttamente correlate alle posizioni dei detriti e quindi difficilmente si ripeteranno alla stessa frequenza.

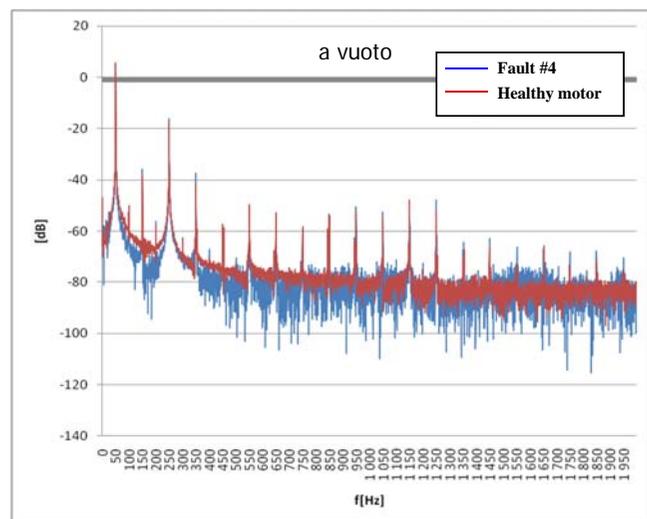
Quindi è impossibile definire alcune frequenze prevedibili da individuare negli spettri della vibrazione o della corrente.

58

## Guasto #4, spettro corrente a vuoto



Nello spettro della corrente c'è solo un leggero aumento di alcune armoniche pari ad alta frequenza (in particolare 16<sup>a</sup>, 18<sup>a</sup> e 22<sup>a</sup>).



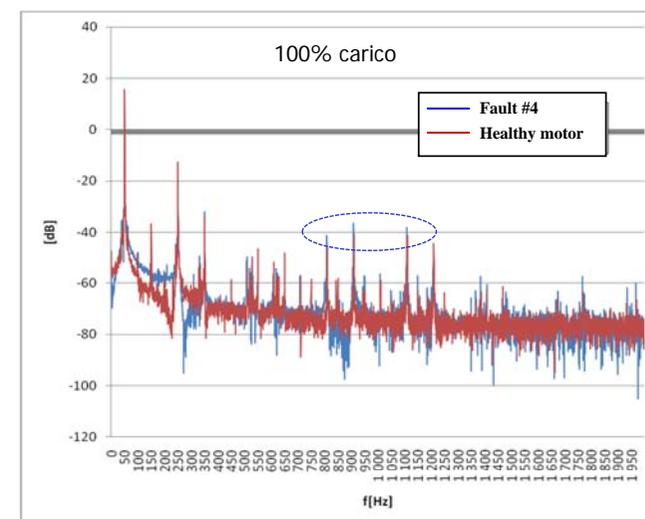
59

## Guasto #4, spettro corrente a carico



Questo aumento è più pronunciato a carico.

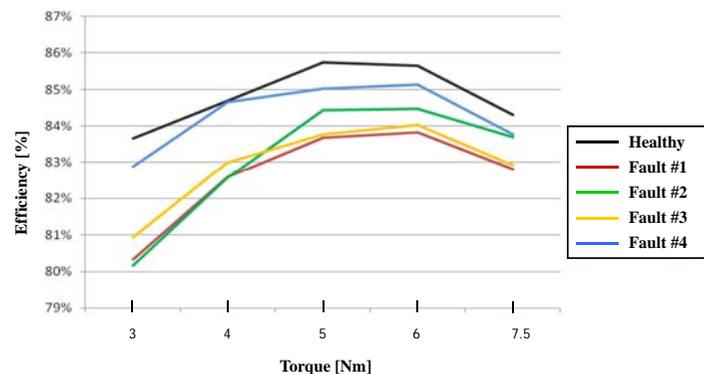
La conclusione potrebbe essere che il guasto #4 non è così serio da danneggiare il funzionamento del motore o che i guasti non ciclici non sono adatti per essere individuati dall'analisi della corrente nel dominio delle frequenze.



60

## Rendimento del motore in diverse condizioni

Tutti i guasti considerati hanno prodotto una diminuzione del rendimento del motore: questa diminuzione raggiunge quasi il 4% a basso carico e l'1,5% a pieno carico nei casi di guasti più seri (#1 cricca nell'anello esterno e #2 deformazione della tenuta).



61

## Conclusioni su analisi di corrente e rendimento

I guasti ciclici nell'anello esterno hanno mostrato notevoli cambiamenti nello spettro della corrente, sia a carico che a vuoto.

Questi cambiamenti sono però diversi da quelli evidenziati negli articoli in letteratura:

- piccoli cambiamenti alle frequenze "prevedibili" per il guasto specifico,
- un considerevole aumento della 3<sup>a</sup> e della 7<sup>a</sup> armonica a vuoto,
- un aumento delle armoniche pari alle alte frequenze a carico.

Quindi per questo tipo di guasto, l'analisi delle correnti di statore sembra efficace a scopi diagnostici.

62

## Conclusioni su analisi di corrente e rendimento

Al contrario, la deformazione della tenuta e la corrosione causano solo leggeri effetti nello spettro della corrente:

- aumento di alcune armoniche dispari a vuoto per la deformazione laterale,
- aumento di alcune armoniche pari a carico per la corrosione.

Quindi in questi casi l'analisi della corrente non fornisce un aiuto efficace nell'individuare il guasto.

Invece, l'analisi del rendimento fornisce interessanti informazioni.

Infatti, la deformazione laterale causa una notevole caduta del rendimento del motore: quindi in questo caso la misura del rendimento potrebbe essere usata come allarme per il monitoraggio dei cuscinetti, anche se essa potrebbe essere influenzata da altri fattori, per es. un guasto che produce qualsiasi tipo di asimmetria nel percorso del flusso.

63

## Conclusioni su analisi di corrente e rendimento

Invece, il guasto causato dalla corrosione provoca solo una leggera diminuzione del rendimento: quindi sembra che questo guasto abbia un leggero effetto sul funzionamento del motore e questa potrebbe essere la ragione per cui risulta difficile da individuare tramite l'analisi della corrente.

In conclusione, l'analisi della corrente può essere, in generale, utilmente impiegata per una diagnostica on-line, poiché la corrente di una fase dell'avvolgimento di statore può essere facilmente misurata durante il normale funzionamento della macchina.

64

## Conclusioni su analisi di corrente e rendimento

Al contrario, l'analisi on-line del rendimento richiede la misura della velocità di rotore e della coppia di carico.

Quest'ultima richiede strumenti costosi, che normalmente non vengono montati sul motore.

Se il carico può essere considerato costante, la corrente di statore può essere un indicatore dell'efficienza.

Negli altri casi, l'uso di un misuratore di coppia può essere considerato conveniente per l'analisi on-line del rendimento solo per macchine di elevata potenza.

Tuttavia, le conclusioni di queste prove sperimentali dovrebbero spingere gli utilizzatori dei motori a considerare una manutenzione preventiva mirata a individuare i guasti non solo per evitare danni catastrofici, ma anche per risparmiare energia.

65

## Cuscinetti radenti (*plain bearings*)



I cuscinetti radenti sono costituiti da una bussola o boccia nella quale ruota l'albero. La boccia è realizzata con materiale meno duro rispetto all'albero, ad esempio bronzo, metallo bianco, stagno, ecc., che agisce da materiale di sacrificio per salvaguardare la parte dell'albero in contatto col cuscinetto.



66

## Cuscinetti radenti

I cuscinetti radenti sono disponibili in tre principali esecuzioni.

I primi due tipi sono impiegati, al posto dei cuscinetti a rotolamento, per macchine rotanti di potenza relativamente elevata, grazie alla loro capacità di sopportare carichi elevati e di resistere a shock e vibrazioni:

1) Cuscinetti radenti idrodinamici, in cui una pellicola d'olio viene creata tramite la rotazione dell'albero. Questo tipo di cuscinetto presenta un alto attrito iniziale ed è utilizzato per macchine di taglia non troppo elevata.

2) Cuscinetti radenti idrostatici, caratterizzati dal continuo rifornimento di olio a una determinata pressione. Questi sono impiegati essenzialmente per grandi macchine, come le turbine e gli alternatori ad esse collegati.

Talvolta si ricorre alla pressurizzazione dell'olio soltanto per l'avviamento, per evitare lo strisciamento dell'albero sulla bronzina.

67

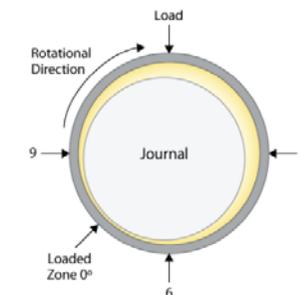
## Cuscinetti radenti

La distanza che si forma tra albero e interno del cuscinetto è nell'ordine delle decine di  $\mu\text{m}$ .

L'azione dinamica che si verifica quando l'albero ruota sviluppa un profilo di pressione dell'olio che determina una forza di sostentamento verso l'alto sull'albero rotante: questa forza laterale sposta leggermente l'asse dell'albero dal centro del cuscinetto stesso.

Per alberi caricati pesantemente, questo effetto è relativamente piccolo e quasi insignificante.

Per alberi poco caricati, invece, questo effetto non può essere trascurato: la conseguenza è che il collegamento tra albero e cuscinetto può diventare instabile e provocare vibrazioni indesiderate che possono ridurre la vita del cuscinetto e influenzare le prestazioni del generatore.

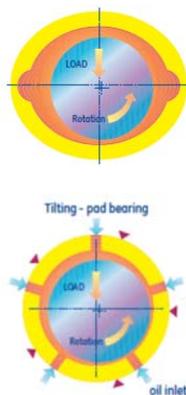


68

## Cuscinetti radenti

Per migliorare la stabilità dei cuscinetti radenti anche a carichi molto bassi, possono essere utilizzati i cuscinetti ellittici o i cuscinetti a pattini oscillanti (*tilting pad bearings*), che però sono molto più costosi. Questi ultimi possono essere anche impiegati (con apposita costruzione) per carichi verticali.

Inoltre, è possibile inserire all'interno di essi delle termocoppie.



69

## Esempi di cuscinetti ad olio per turbine



70

## Esempi di cuscinetti ad olio per alternatori



Anche i cuscinetti radenti possono essere soggetti ai guasti dovuti alle correnti d'albero che si scaricano attraverso le parti metalliche e il film d'olio dei cuscinetti stessi (si veda dispensa sulle correnti d'albero).

71

## Guasti nei cuscinetti ad olio

I guasti incipienti dei cuscinetti ad olio producono livelli di vibrazione della cassa del cuscinetto molto basse, a causa del grande smorzamento introdotto dall'olio che si trova tra le superfici del cuscinetto (le vibrazioni dell'albero vengono smorzate prima di arrivare alla cassa del cuscinetto).

Per questo motivo, per la diagnostica dei cuscinetti ad olio si introduce la misura della vibrazione relativa tra albero e cassa del cuscinetto, attraverso sensori di spostamento (captatore di prossimità).

Questo vale per l'analisi di frequenze basse, al di sotto di tre volte la velocità di rotazione. Per alte frequenze, si utilizzano sempre gli accelerometri sulla cassa del cuscinetto, che possono individuare uno sbilanciamento dell'albero.

Si osserva che, quando il cuscinetto è caricato pesantemente, lo spessore del film d'olio diminuisce: questo fatto rende più facilmente individuabile gli eventuali difetti attraverso l'analisi delle vibrazioni.

72

## Guasti nei cuscinetti ad olio

Una sorgente di rumore e vibrazione nei cuscinetti ad olio è data dalle turbolenze che si possono creare nell'olio ("oil whirl") a causa dell'instabilità del film d'olio e in conseguenza a carichi non usuali del cuscinetto.

Questo malfunzionamento eccita la componente di vibrazione alla metà della frequenza di rotazione: questo perché il film d'olio vicino all'albero ruota alla velocità dell'albero, mentre il film d'olio vicino al cuscinetto è stazionario. Quindi la velocità media dell'olio è circa pari alla metà della velocità di rotazione dell'albero. Questo difetto è più comune in cuscinetti poco caricati e può essere minimizzato variando la viscosità del lubrificante o aumentando la pressione dell'olio.

Bisogna evitare che questa frequenza corrisponda alla frequenza naturale dell'albero.

## Altri cuscinetti radenti

Il terzo tipo di cuscinetto radente non utilizza olio, ma la superficie delle boccole è costituita da uno strato in politetrafluoroetilene (PTFE):



Questi cuscinetti presentano un livello di attrito minimo, sono esenti da manutenzione e sono impiegati per applicazioni particolari: bassissimi carichi e necessità di evitare la manutenzione (es. ventole dei computer).