

Diagnostica cuscinetti volventi

G. D'Elia

Principali difetti e loro cause

- ❑ Il contatto tra elementi rotolanti e piste è caratterizzato da elevata pressione superficiale.
- ❑ Gli elementi rotolanti sono soggetti a fenomeni di fatica superficiale.
- ❑ La maggior parte dei malfunzionamenti si manifesta in un danno superficiale nelle piste o negli elementi rotolanti.
- ❑ Il danno superficiale più comune è il ***pitting***.
- ❑ Rumore, vibrazioni, surriscaldamento, sono le più comuni conseguenze.

Pitting - asporto di materiale in superficie che dà luogo a scalfitture sulle piste o sugli elementi volventi.

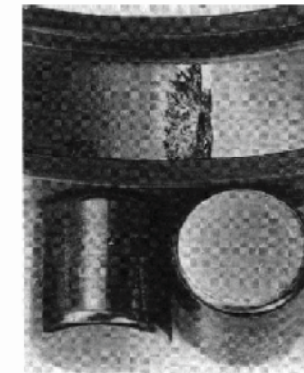


Cause dei difetti superficiali

Cause dei difetti nei cuscinetti a rotolamento	
Sovraccarichi (disallineamento, picchi di carico, montaggio scorretto).	Velocità superiore ai limiti.
Difetti creati prima o durante il montaggio (cattiva manipolazione al magazzino)	Passaggio di correnti elettriche.
Contaminazione (tenute inefficienti).	Vibrazioni.
Difetti nel materiale.	Scarsa lubrificazione.
Difetti di produzione.	Ambiente operativo "severo".

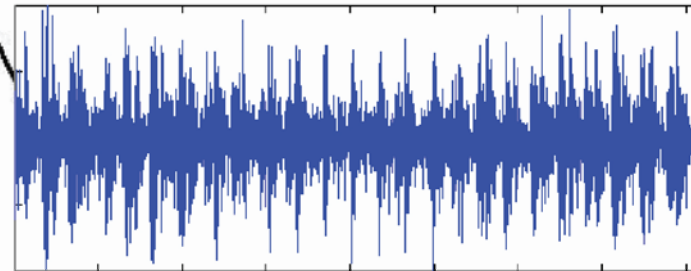
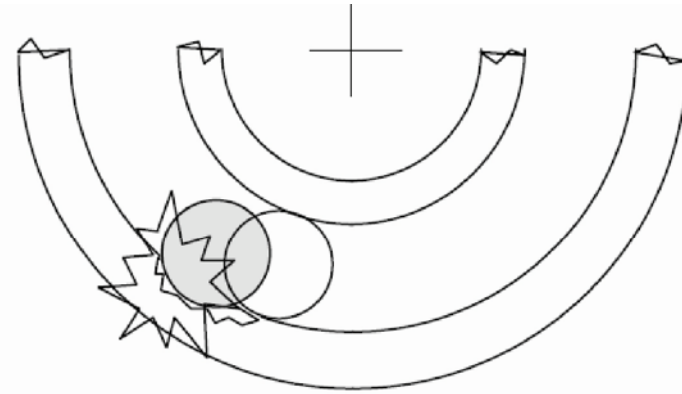
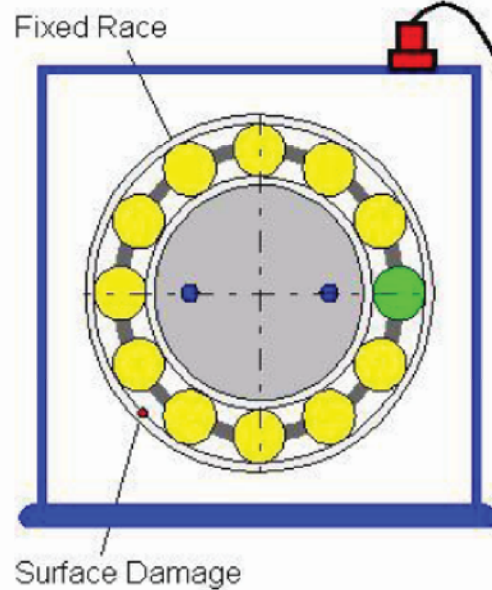
❑ Altri difetti:

- giochi tra anello interno ed albero o anello esterno e foro (dovuti a usura o inefficacia del serraggio);
- perdita di lubrificazione;
- eccessivo carico assiale in cuscinetti radiali.



Conseguenze dei difetti superficiali

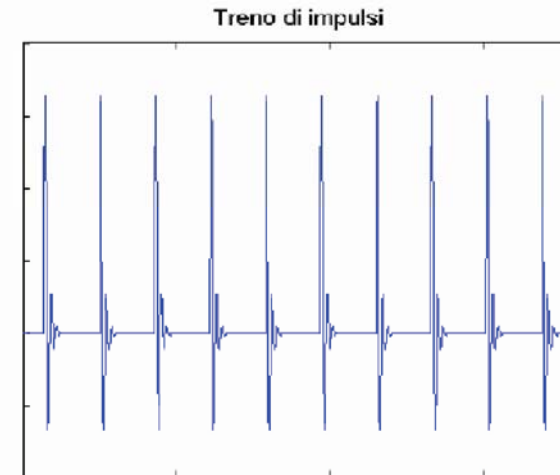
- ❑ Ogni volta che un elemento volvente incontra un danno superficiale (cratere) avviene un impatto.



- ❑ Gli impatti originano **treni di forze impulsive** che sono sorgenti di vibrazione e, di conseguenza, fonti di rumore.

Caratteristiche del segnale vibratorio

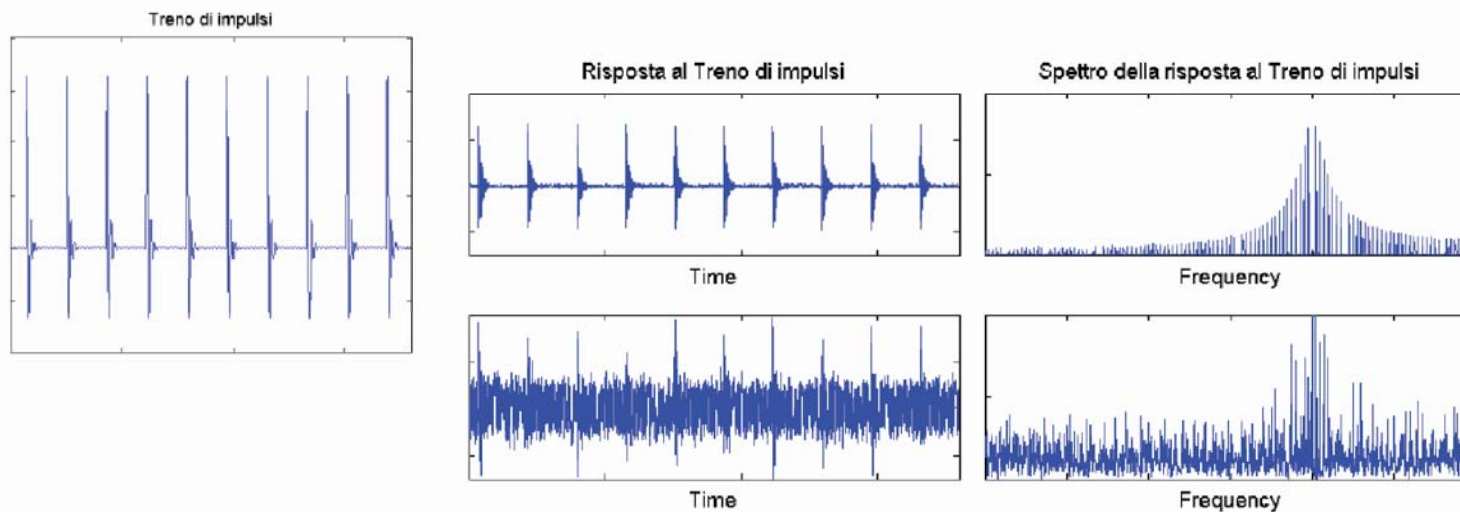
- ❑ Ogni danno localizzato è caratterizzato da una frequenza, detta **frequenza caratteristica**, che è proporzionale alla velocità di rotazione del cuscinetto.
- ❑ La frequenza caratteristica è la frequenza degli impatti dell'elemento volvente con il danno e dipende da:
 - caratteristiche geometriche del cuscinetto
 - numero di elementi rotolanti
 - localizzazione del danno (sull'anello esterno, interno, ...)



- ❑ Le vibrazioni sono generalmente misurate sul carter.
- ❑ La vibrazione è la risposta della struttura all'eccitazione impulsiva periodica.

Caratteristiche del segnale vibratorio

- ❑ La risposta della struttura all'eccitazione impulsiva ha un contenuto in frequenza legato a:
 - frequenza degli impatti;
 - risonanze della struttura (alte frequenze: oltre 8-10 kHz).
- ❑ Alle basse frequenze, le frequenze degli impatti sono spesso mascherate da altri effetti.
- ❑ L'analisi delle vibrazioni per il monitoraggio e la diagnostica è pertanto solitamente eseguita alle alte frequenze.



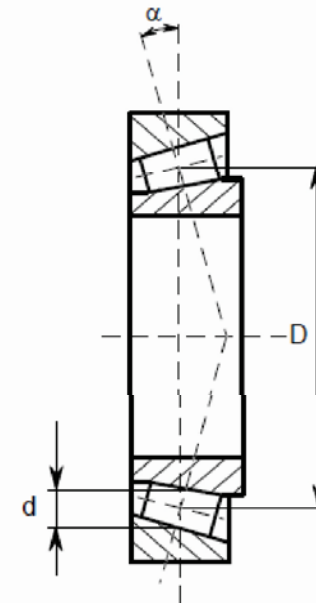
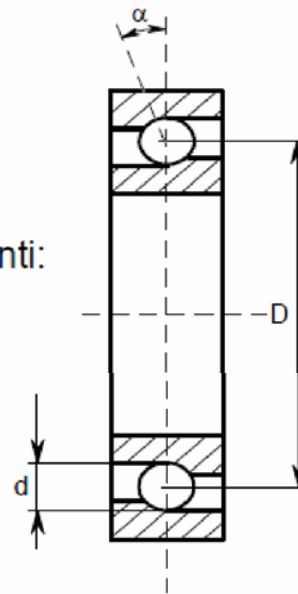
Frequenze caratteristiche

- ❑ Ogni volta che un elemento rotolante attraversa il danno ha luogo un impatto.
- ❑ Se il moto delle sfere o dei rulli avviene senza strisciamento, è facile trovare la frequenza di tali impatti dallo studio della cinematica del cuscinetto (nell'ipotesi che un solo difetto sia presente).

Geometria dei cuscinetti volventi:

a) Cuscinetto a sfere

b) Cuscinetto a rulli conici



Frequenze caratteristiche

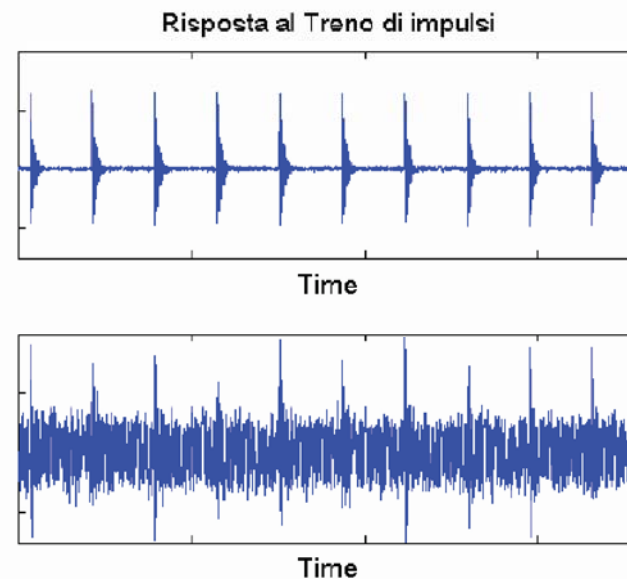
	Anello esterno fisso ($n_e = 0$)	Anello interno fisso ($n_i = 0$)	Anelli esterno ed interno rotanti
Difetto sull'anello interno	$f_i = \frac{zn_i}{120}(1 + \lambda \cos \beta)$	$f_i = \frac{zn_e}{120}(1 + \lambda \cos \beta)$	$f_i = \frac{z n_e - n_i }{120}(1 + \lambda \cos \beta)$
Difetto sull'anello esterno	$f_e = \frac{zn_i}{120}(1 - \lambda \cos \beta)$	$f_e = \frac{zn_e}{120}(1 - \lambda \cos \beta)$	$f_e = \frac{z n_e - n_i }{120}(1 - \lambda \cos \beta)$
Difetto sui corpi volventi	$f_v = \frac{n_i}{120} \frac{1 - (\lambda \cos \beta)^2}{\lambda}$	$f_v = \frac{n_e}{120} \frac{1 - (\lambda \cos \beta)^2}{\lambda}$	$f_v = \frac{ n_e - n_i }{120} \frac{1 - (\lambda \cos \beta)^2}{\lambda}$
Difetto sulla gabbia	$f_p = \frac{n_i}{120}(1 - \lambda \cos \beta)$	$f_p = \frac{n_e}{120}(1 + \lambda \cos \beta)$	$f_p = \frac{n_e + n_i}{120} + \frac{n_e - n_i}{120} \lambda \cos \beta$

Si può osservare che ad ogni giro:

- Circa il 40% dei corpi volventi passa sopra un difetto dell'anello esterno
- Circa il 60% dei corpi volventi passa sopra un difetto dell'anello interno
- La frequenza della gabbia è pari a circa il 40% della frequenza di rotazione se l'anello esterno è fisso, mentre vale circa il 60% della frequenza di rotazione se l'anello esterno è mobile.

Analisi del segnale vibratorio

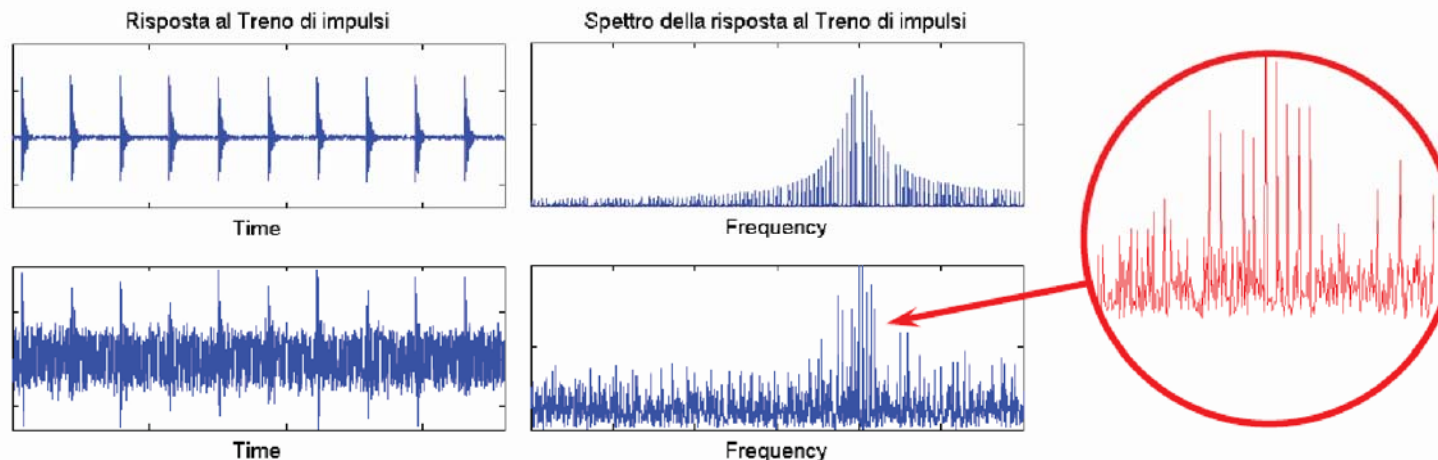
- ☐ Un cuscinetto sano è sorgente di vibrazioni molto basse.
- ☐ Si può parlare di cuscinetto “silenzioso”.
- ☐ Nel caso di cuscinetto danneggiato ha luogo un “treno di forze impulsive” caratterizzato da una certa frequenza caratteristica (e dalle sue armoniche).
- ☐ L'analisi in frequenza del segnale vibratorio dovrebbe essere un buono strumento per identificare il danno.
- ☐ Sfortunatamente le vibrazioni causate dal danno possono essere oscurate da altre sorgenti di vibrazione.
- ☐ Queste generalmente hanno un elevato contenuto alle basse frequenze impedendo la diagnosi del difetto.



Analisi del segnale vibratorio

- ❑ Gli impatti di breve durata sono in grado di eccitare le risonanze strutturali del carter che hanno generalmente frequenze alte (qualche kHz).
- ❑ Alle alte frequenze il rumore e gli effetti delle altre sorgenti di vibrazione sono molto bassi.
- ❑ Il segnale vibratorio si presenta come un treno di picchi seguiti da oscillazioni alle frequenze naturali della struttura (che si smorzano rapidamente).

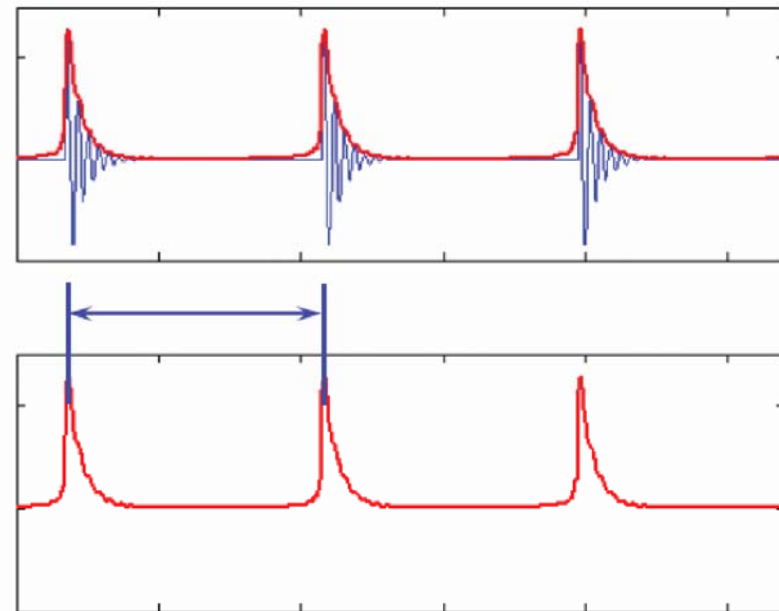
Il danno superficiale viene identificato analizzando la vibrazione del carter nella zona di risonanza della struttura



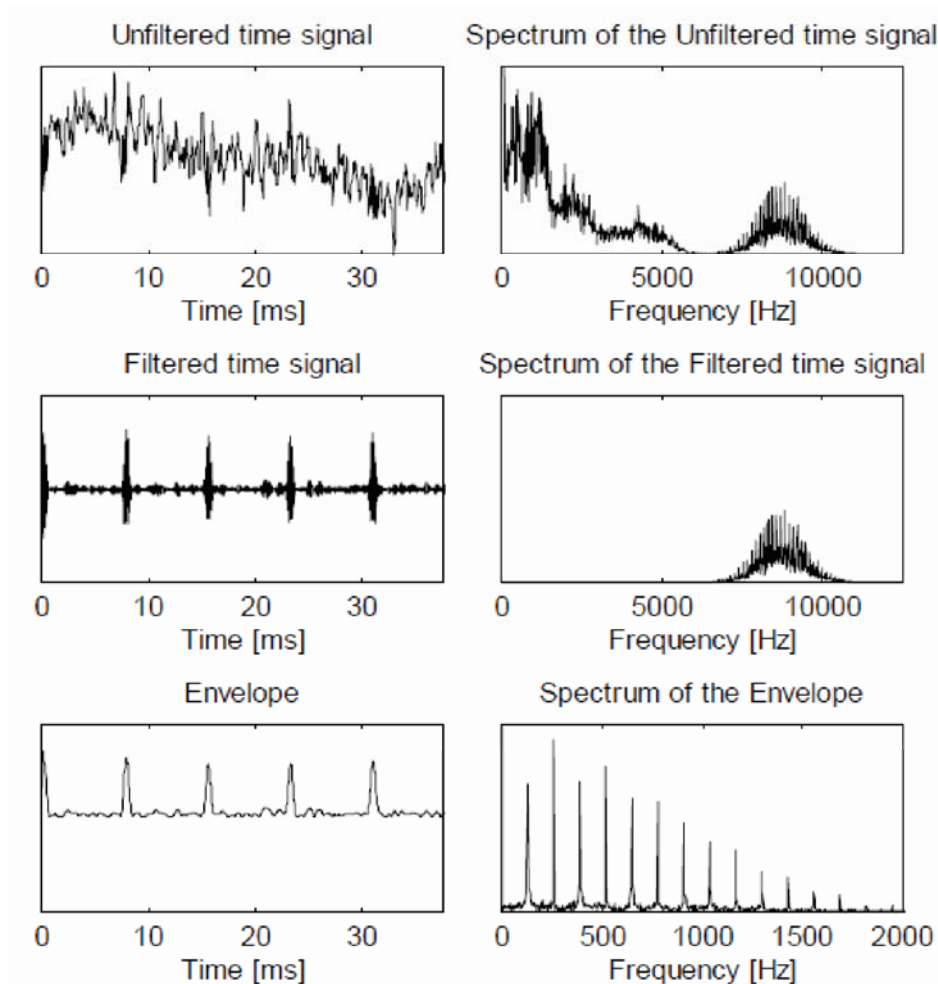
Analisi del segnale vibratorio

- ❑ Un treno di picchi seguiti da oscillazioni alle frequenze naturali della struttura (che si smorzano rapidamente).
- ❑ Nell'intorno di una risonanza f_n il segnale si presenta come un treno di onde sinusoidali smorzate:
- ❑ La periodicità del treno (inverso della frequenza caratteristica del difetto) può essere trovata con l'ausilio di tecniche di demodulazione (*inviluppo*).

$$x(t) = e^{-\zeta t} X \cos(2\pi f_n t + \Phi)$$



Analisi del segnale vibratorio

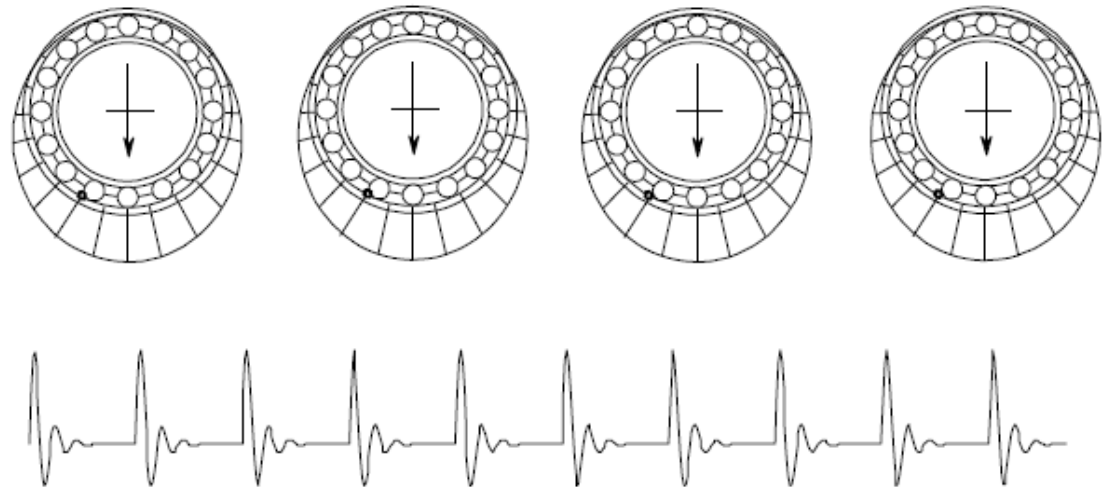


□ Il metodo classico per la demodulazione di ampiezza consiste in:

- Filtrare in passa-banda il segnale attorno ad una frequenza di risonanza
- Involuppare il segnale filtrato
- Lo spettro dell'involuppo rivela le frequenze caratteristiche del difetto.

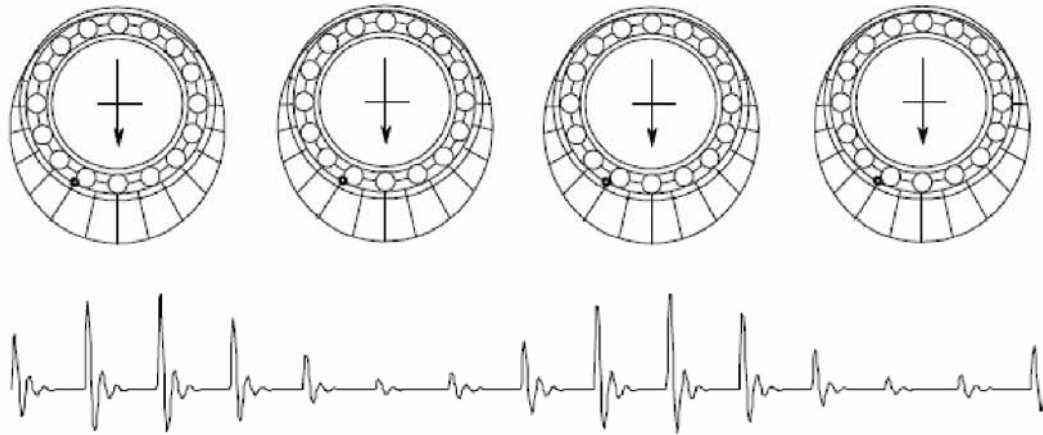
Modulazione del carico

- ❑ L'intensità dell'impulso generato dall'attraversamento del danno superficiale è proporzionale al carico agente sull'elemento rotolante al momento del passaggio sul difetto stesso.
- ❑ In caso di cuscinetti radiali, ciò significa che l'intensità potrebbe essere modulata, così come la vibrazione che ne risulta.
- ❑ Si consideri prima un cuscinetto radiale con anello esterno fisso, anello interno rotante e carico fisso (e costante)
 - Se il danno è sull'anello fisso, il carico sull'elemento rotolante che lo attraversa è sempre lo stesso, per cui **non si ha alcun effetto di modulazione del carico.**



Modulazione del carico

- ❑ Se il danno è sull'anello rotante o su un elemento rotolante, il carico agente al momento del passaggio sul danno dipende dalla posizione radiale, perciò varia periodicamente e **l'intensità dell'impulso è modulata.**

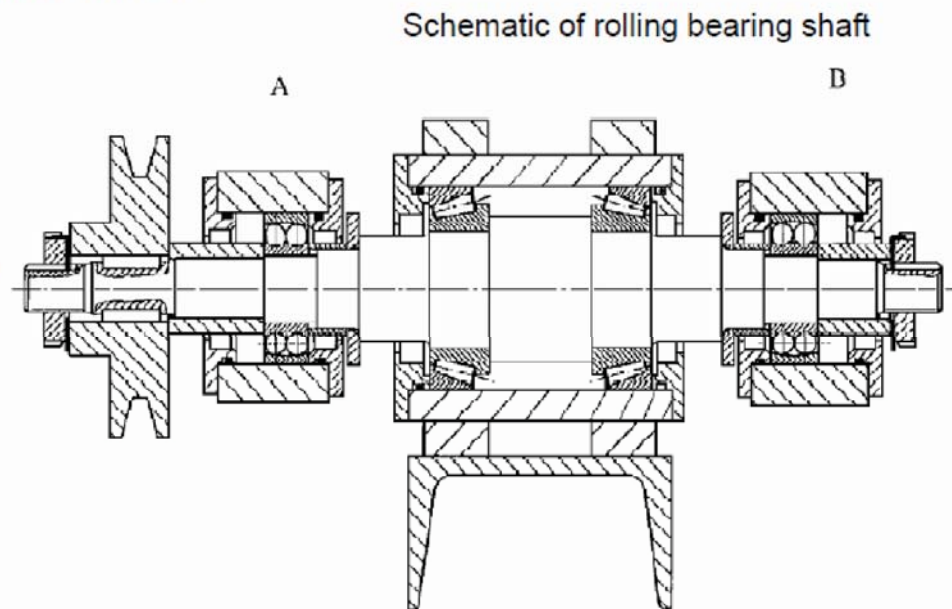


- ❑ Si consideri ora un cuscinetto radiale con anello esterno fisso, anello interno rotante e carico variabile. Il carico può variare a causa di una forza centrifuga rotante, può essere un carico esterno variabile periodicamente, ecc... In tal caso, l'intensità dell'impulso è modulata, anche in caso di danno sull'anello fisso.
- ❑ Quando l'intensità dell'impatto è modulata da una certa frequenza f_m , due o più bande laterali appaiono nello spettro di vibrazione del carter, attorno alle frequenze caratteristiche ed alla distanza $\pm f_m$, $\pm 2f_m$, e così via.

Diagnostica cuscinetti: esempio

- ❑ Segnali di vibrazione sono stati misurati sul banco prova per cuscinetti volventi mostrato in figura.
- ❑ Un carico radiale di 500 N è applicato ad entrambi i cuscinetti A e B.
- ❑ Il cuscinetto testato è indicato con **B**.

- ❑ Alcuni cuscinetti con differenti tipi di difetto sono stati via via testati e i segnali di vibrazione sono stati rilevati con un accelerometro montato in direzione radiale vicino al supporto del cuscinetto **B**.
- ❑ I difetti sono stati creati artificialmente mediante una penna elettrica.



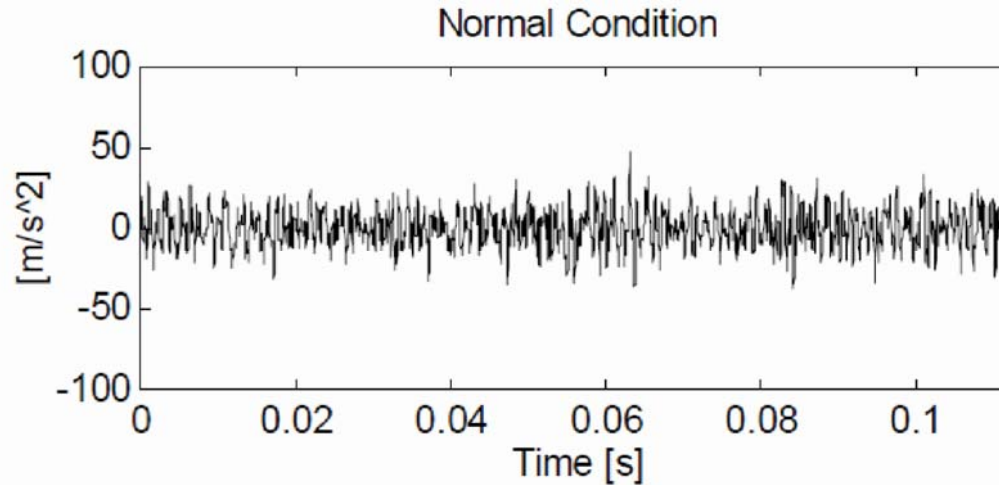
Esempio

- ❑ I cuscinetti impiegati sono orientabili a sfere FAG 1204.
- ❑ Alla frequenza di rotazione dell'albero di 26.67 Hz (circa 1600 rpm), le frequenze caratteristiche dei difetti sono:
 - Outer race defect frequency: 129.8 Hz (1 / 7.70 ms)
 - Inner race defect frequency: 190.2 Hz (1 / 5.26 ms)
 - Rolling element defect frequency: 133.7 Hz (1 / 7.48 ms)
 - Cage rotational frequency: 10.8 Hz (1 / 92.60 ms)
- ❑ Le condizioni testate sono le seguenti:
 - Condizione normale
 - Difetto sull'anello esterno
 - Difetto sull'anello interno
 - Difetto su una sfera

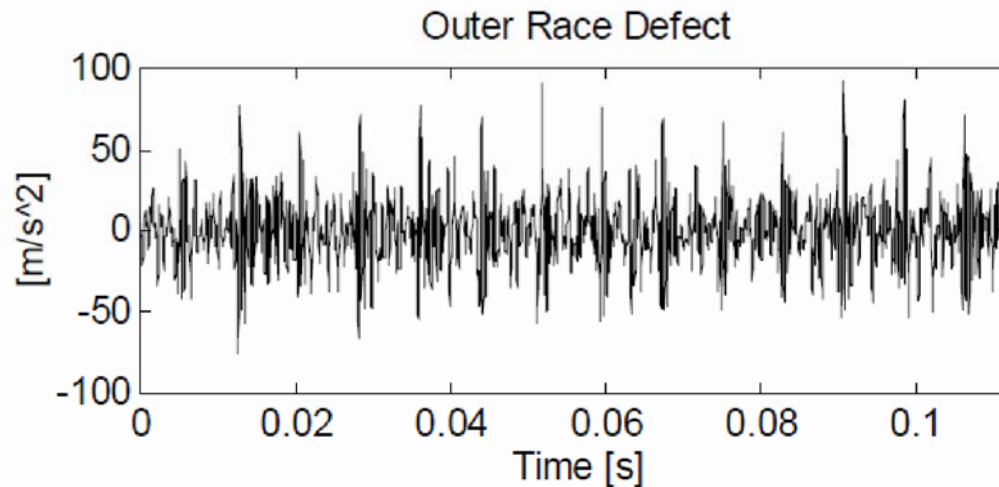
❑ NOTA - Accade spesso che le frequenze abbiano valori inferiori rispetto a quelli calcolati a causa di piccoli slittamenti tra gli elementi volventi.

Esempio

- ❑ Cuscinetto in condizioni **normali**: tre periodi di rotazione.



- ❑ Cuscinetto con difetto sull'anello **esterno**: tre periodi di rotazione.
 - Outer race defect frequency (1 / 7.70 ms)

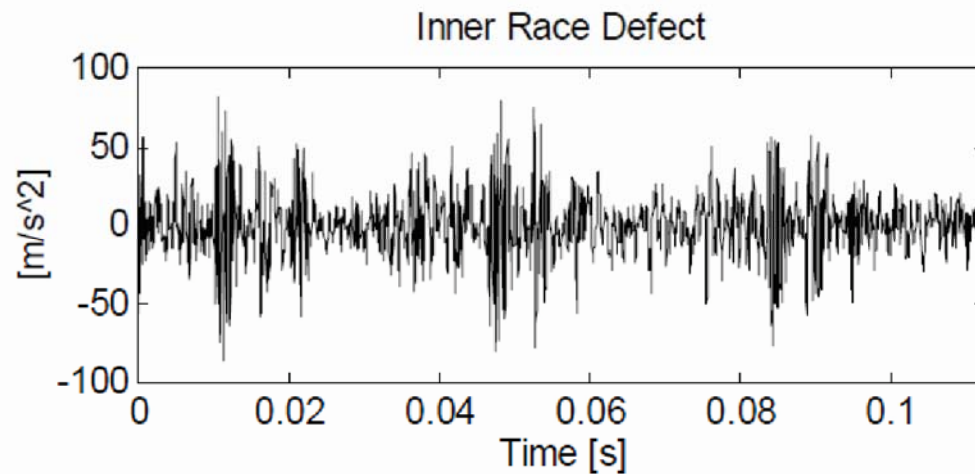
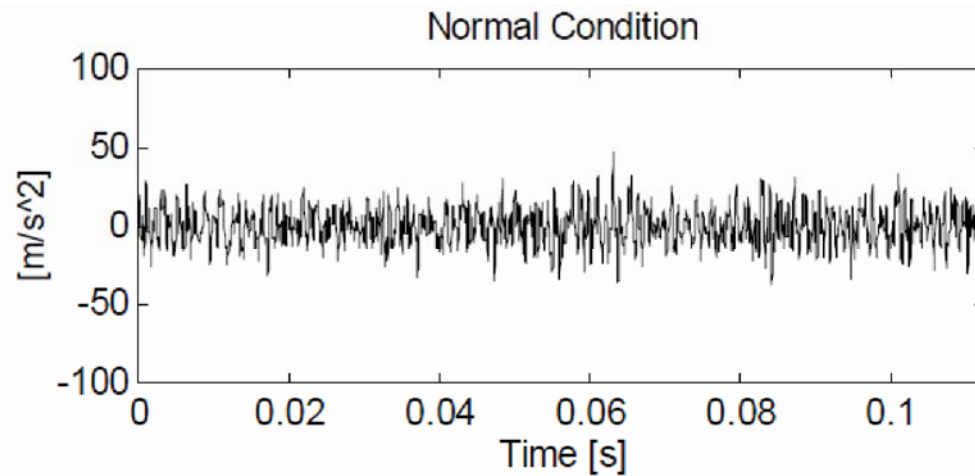


Esempio

❑ Cuscinetto in condizioni **normali**: tre periodi di rotazione.

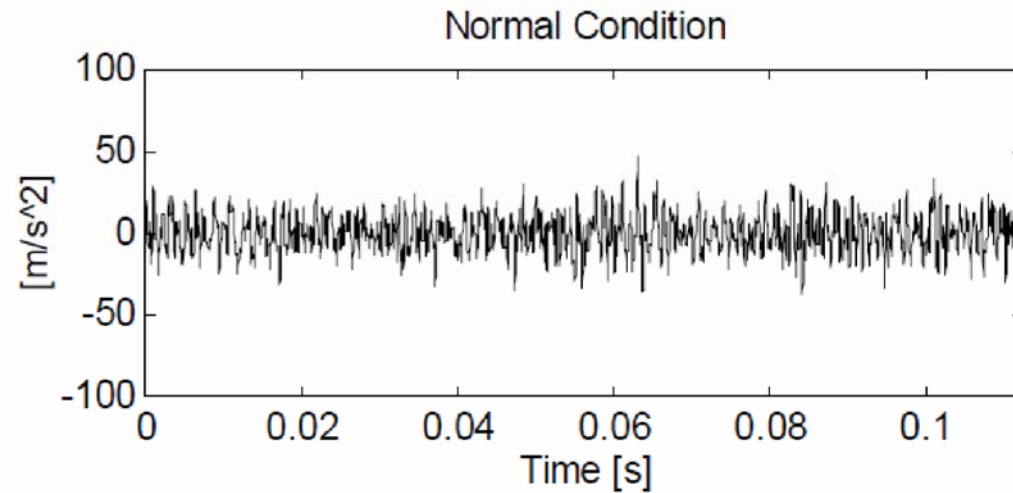
❑ Cuscinetto con difetto sull'anello **interno**: tre periodi di rotazione.

- Inner race defect frequency (1 / 5.26 ms)

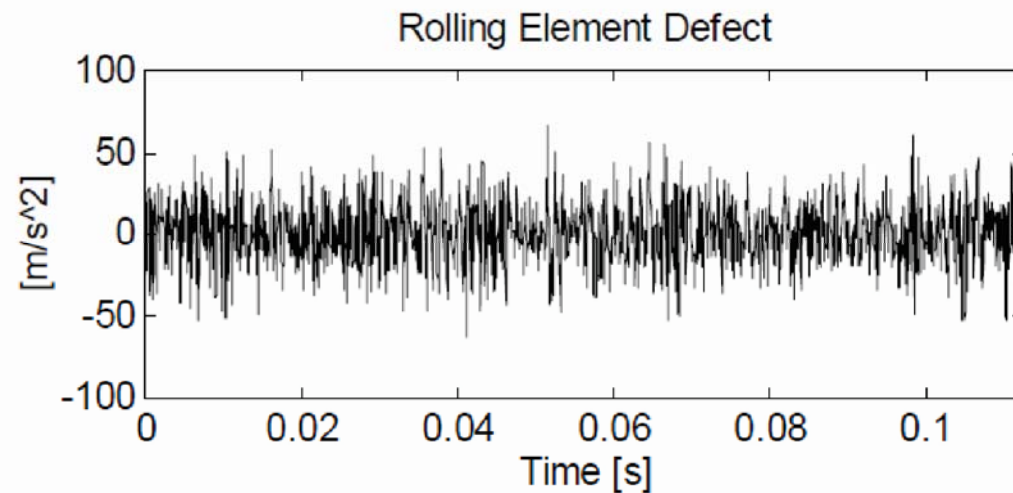


Esempio

- ❑ Cuscinetto in condizioni **normali**: tre periodi di rotazione.

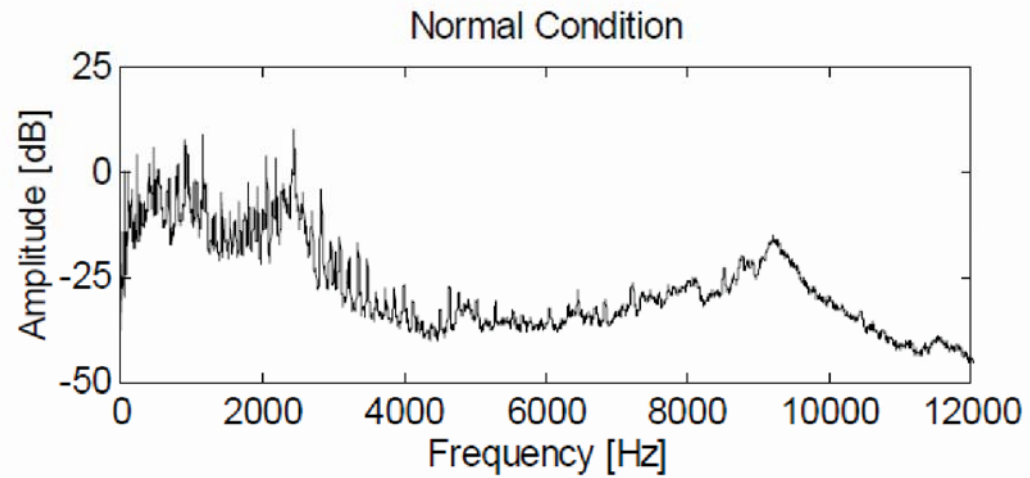


- ❑ Cuscinetto con difetto su una **sfera**: tre periodi di rotazione.
 - Rolling element defect frequency (1 / 7.48 ms)

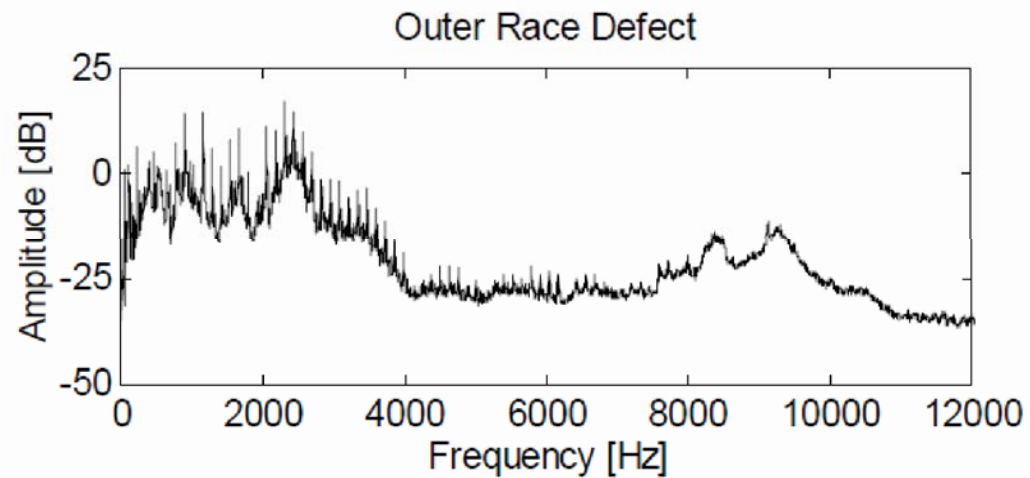


Esempio

☐ Cuscinetto in condizioni **normali**.

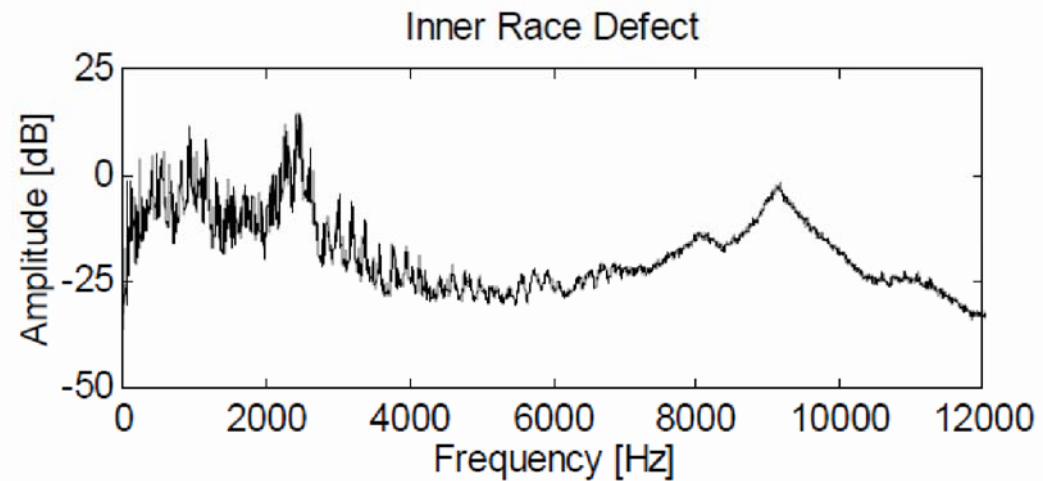


☐ Cuscinetto con difetto sull'anello **esterno**.

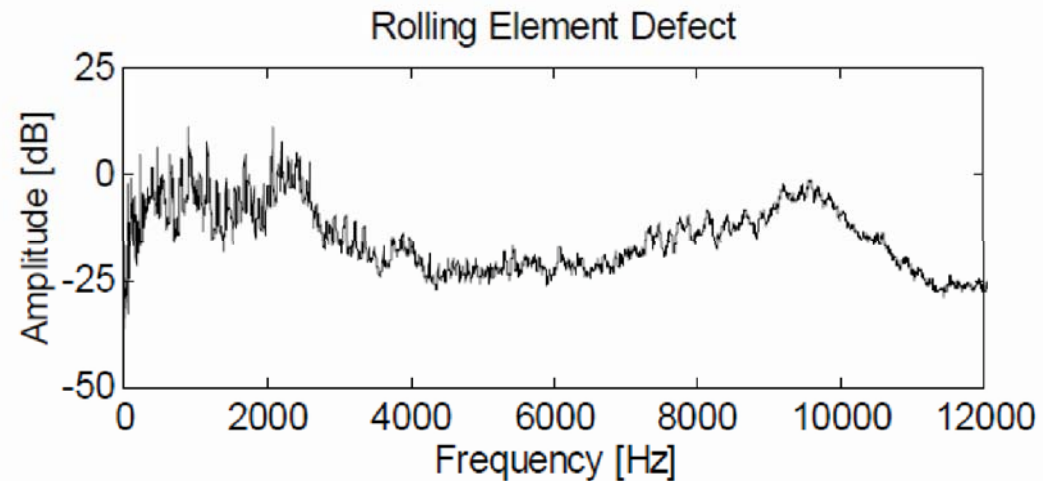


Esempio

☐ Cuscinetto con difetto sull'anello **interno**.

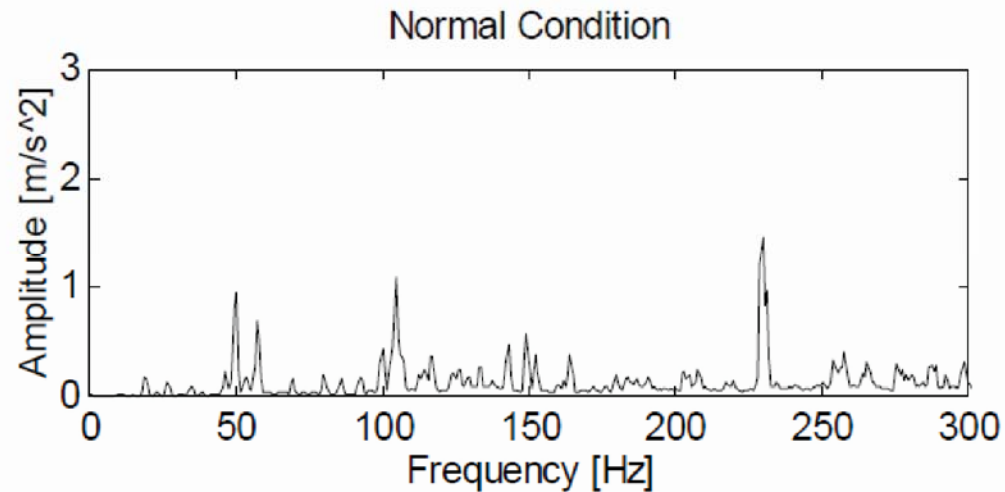


☐ Cuscinetto con difetto su una **sfera**.

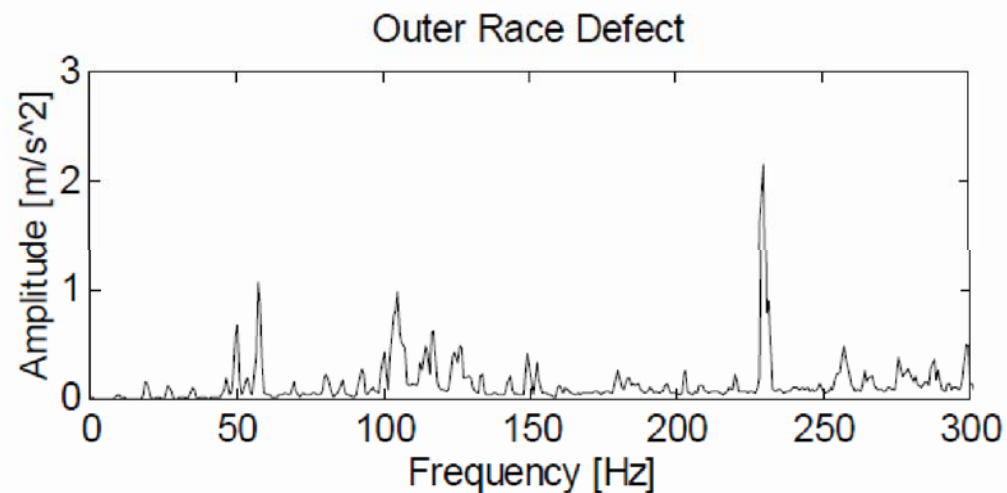


Esempio: Spettro – basse frequenze

- Cuscinetto in condizioni **normali**.



- Cuscinetto con difetto sull'anello **esterno**.
 - Outer race defect frequency 129.8 Hz



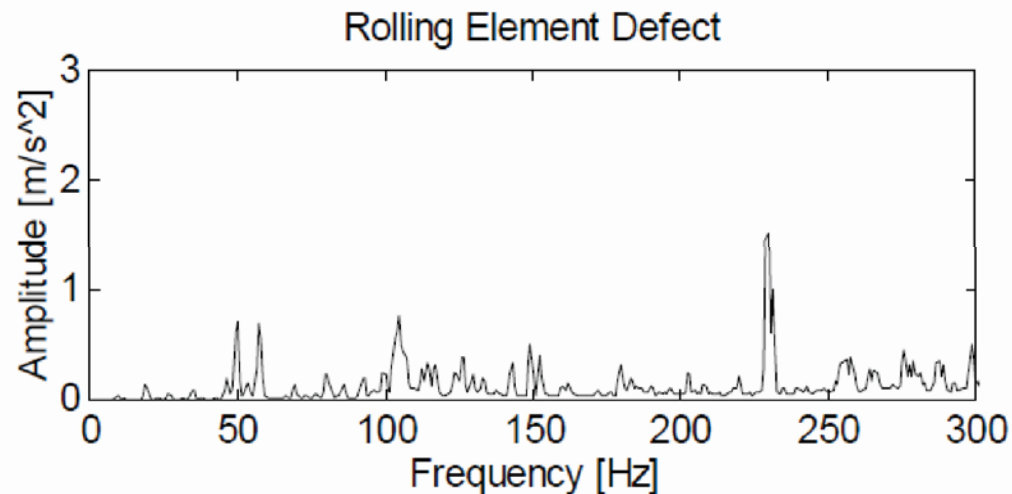
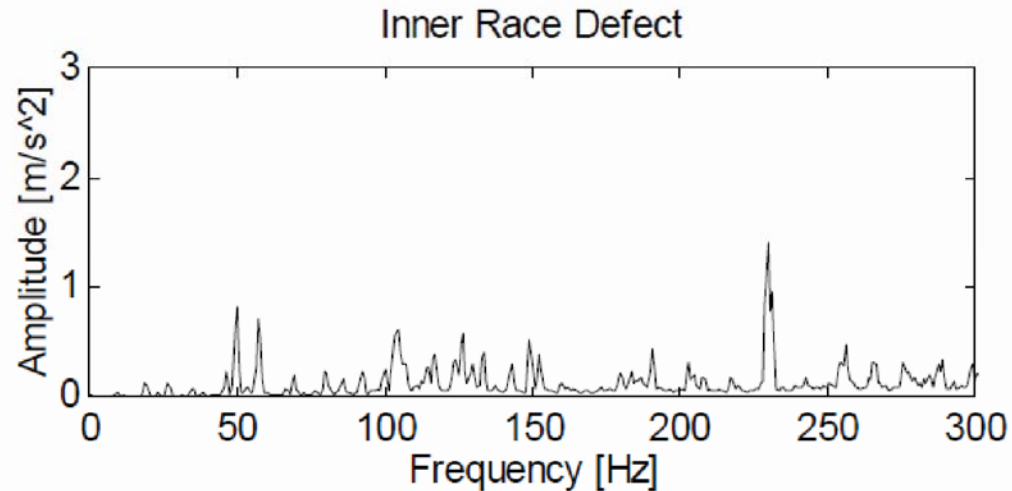
Esempio: Spettro – basse frequenze

- ❑ Cuscinetto con difetto sull'anello **interno**.

- Inner race defect frequency 190.2 Hz

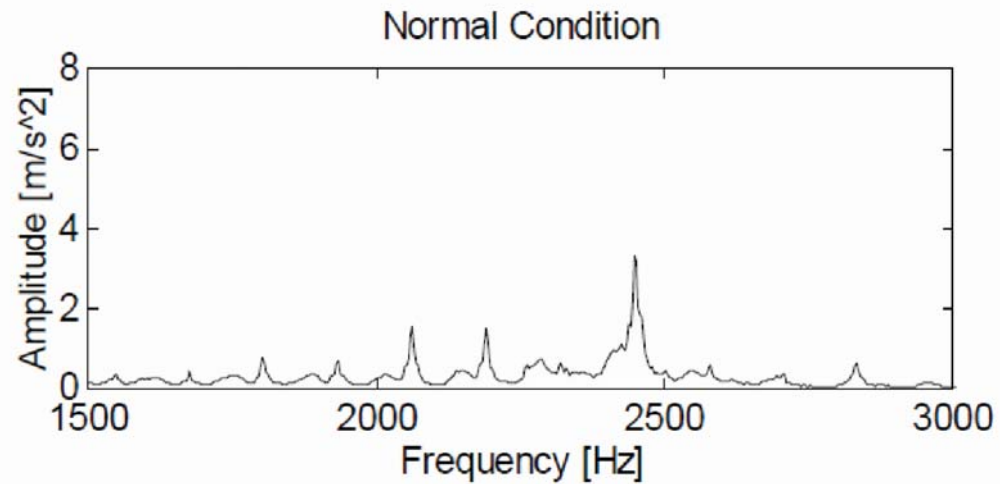
- ❑ Cuscinetto con difetto su una **sfera**.

- Rolling element defect frequency 133.7 Hz



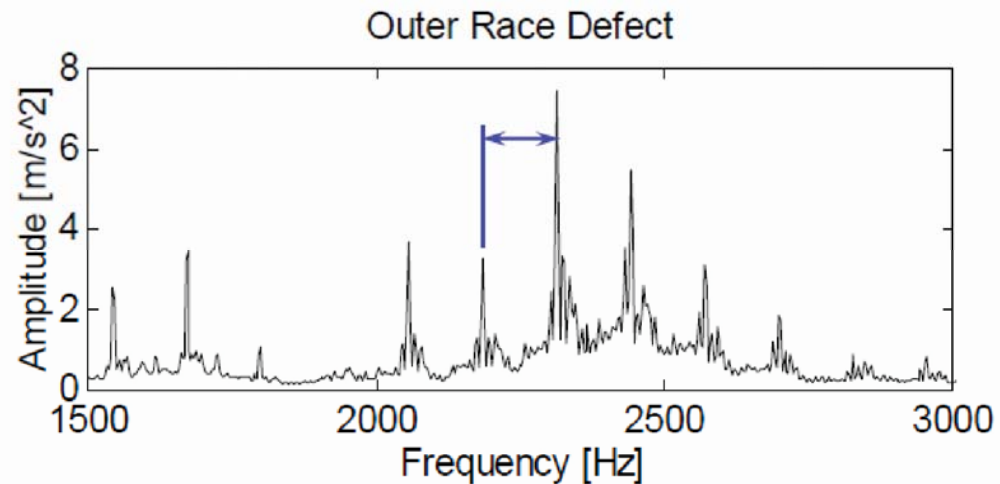
Esempio: Spettro – risonanza 2.4kHz

- ❑ Cuscinetto in condizioni **normali**.



- ❑ Cuscinetto con difetto sull'anello **esterno**.

- Outer race defect frequency 129.8 Hz



Esempio : Spettro – risonanza 2.4kHz

❑ Cuscinetto con difetto sull'anello **interno**.

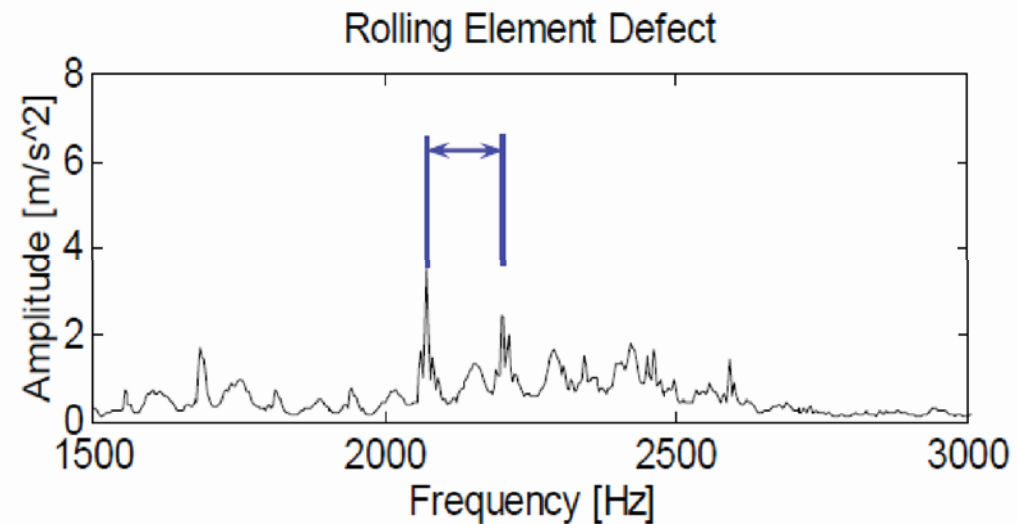
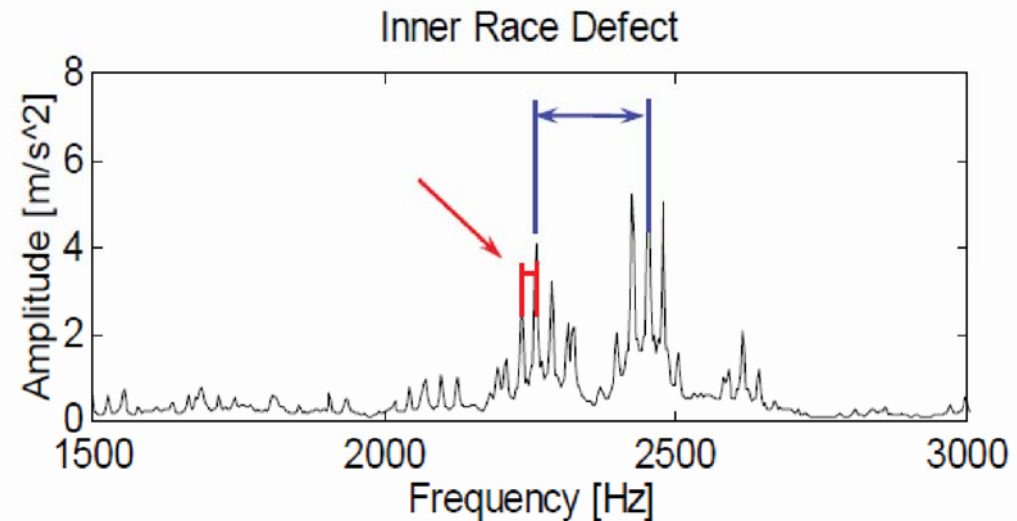
- Inner race defect frequency

190.2 Hz

❑ Cuscinetto con difetto su una **sfera**.

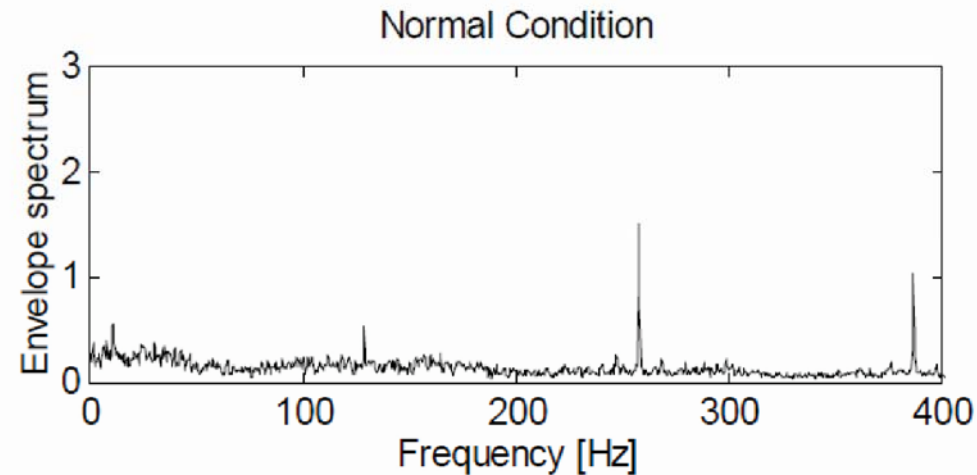
- Rolling element defect frequency

133.7 Hz



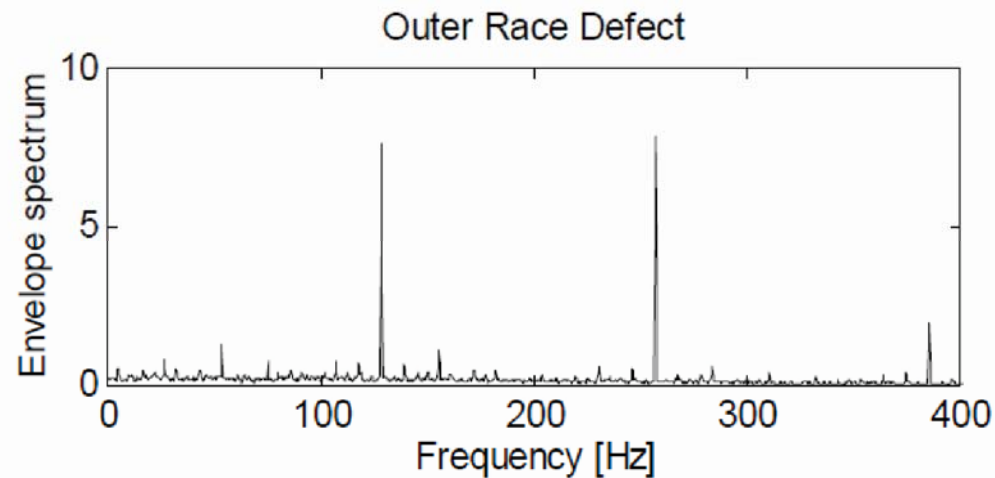
Esempio: Spettro dell'involuppo

- ❑ Cuscinetto in condizioni **normali**.



- ❑ Cuscinetto con difetto sull'anello **esterno**.

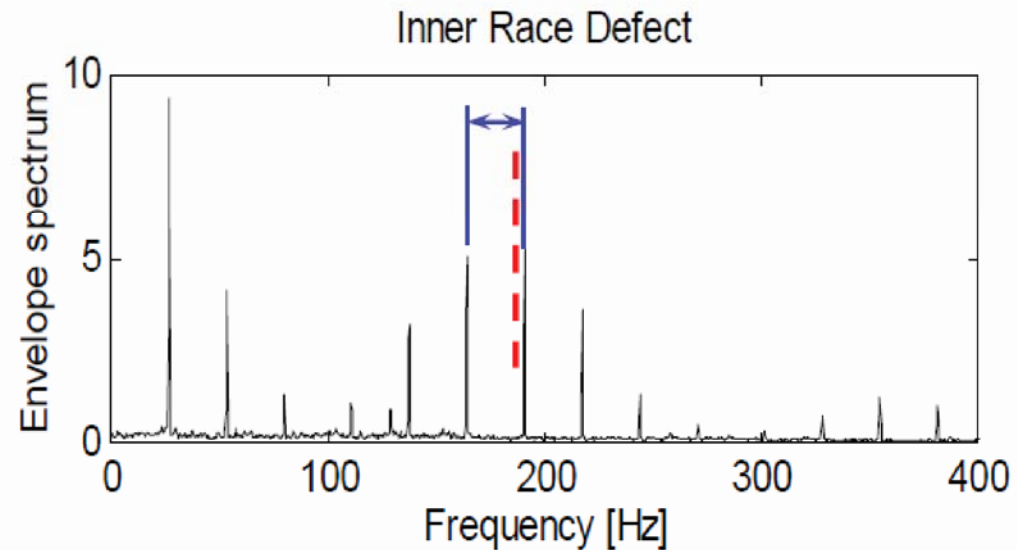
- Outer race defect frequency 129.8 Hz



Esempio : Spettro dell'involuppo

- ❑ Cuscinetto con difetto sull'anello **interno**.

- Inner race defect frequency 190.2 Hz



- ❑ Cuscinetto con difetto su una **sfera**.

- Rolling element defect frequency 133.7 Hz

