

Monitoraggio e diagnostica dei sistemi meccanici

Gianluca D'Elia

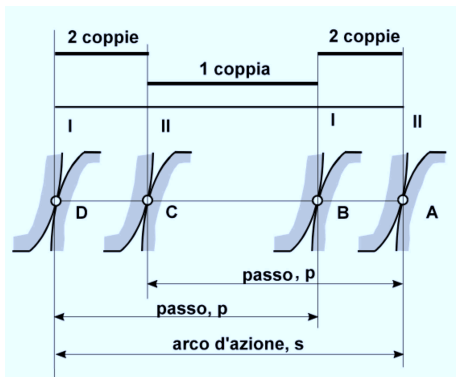
Principali difetti e cause di malfunzionamento negli ingranaggi - 1

Difetto	Descrizione	Cause
Usura	Asporto di materiale alla superficie del dente dovuto a fenomeni di attrito.	Lubrificazione inadeguata.
Fatica Superficiale (pitting)	Asporto di materiale alla superficie del dente dovuto a fenomeni di fatica.	Presenza di elevati carichi dinamici.
Spalling	Asporto di scaglie di materiale alla superficie del dente.	Sviluppo del pitting. Brusca transizione tra il cuore di materiale tenace e lo strato superficiale fragile indurito e/o temprato. Difetti metallurgici localizzati.
Crack	Frattura del dente, tipicamente al piede dovuta alla propagazione di cricche di fatica	Non corretto processo di lavorazione. Fenomeni di fatica. Usualmente porta alla rottura del dente.
Rottura	Rottura dell'interno del dente.	Fenomeni di fatica. Sovraccarichi.

Principali difetti e cause di malfunzionamento negli ingranaggi - 2

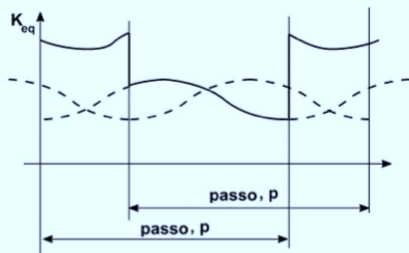
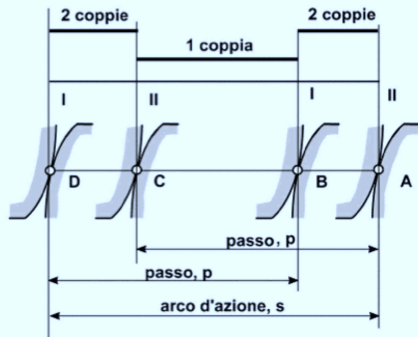
Malfunzionamento	Descrizione	Cause
Eccentricità	Assi geometrici della ruota e dell'albero non coincidenti. Imperfetta circolarità della ruota.	Errori di costruzione o di montaggio.
Perdite di contatto tra ruota-cuscinetto-albero	Eccessivo gioco tra ruota e albero o tra cuscinetto e albero.	Errori di costruzione.
Disallineamento	Assi delle ruote non paralleli o non complanari.	Errori di costruzione o di montaggio.
Gioco eccessivo		Errori di progettazione, di costruzione o di montaggio.

Rigidezza di ingranamento - 1



- ▶ Per la continuità dell'ingranamento il fattore di ricoprimento ϵ deve essere maggiore di 1.
- ▶ Il numero delle coppie di denti in presa è variabile.
- ▶ A parità di carico esterno, la forza agente su una coppia di denti in presa subisce pertanto brusche variazioni lungo il segmento di azione.
- ▶ Se le ruote sono infinitamente rigide, tale variazione non influenza il rapporto di trasmissione.
- ▶ In realtà la rigidezza dei denti non è infinita, bensì è finita.

Rigidezza di ingranamento - 2



- ▶ In particolare, la rigidezza di ingranamento dipende dal punto di contatto lungo levoltente.
- ▶ Nel caso ci siano più coppie di denti in presa va composta in "parallelo".
- ▶ La rigidezza di ingranamento varia con periodicità corrispondente al passo.
- ▶ La frequenza fondamentale dell'onda di rigidezza di ingranamento e la frequenza di ingranamento.
- ▶ Conseguenze:
 - ▶ La flessione dei denti varia durante l'ingranamento.
 - ▶ Il rapporto di trasmissione non è costante (errore di trasmissione).
 - ▶ Le forze di ingranamento sono variabili.

Frequenza di ingranamento - Errore di trasmissione

Frequenza di ingranamento pari a:

$$f_g = z_1 f_{r1} = z_2 f_{r2}$$

dove z_1 e z_2 sono il numero di denti delle due ruote ed f_{r1} e f_{r2} le rispettive frequenze di rotazione

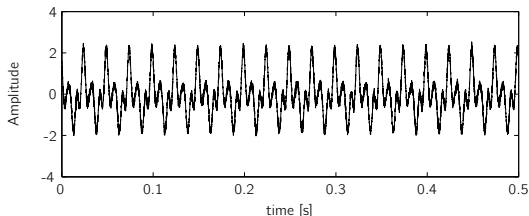
Errore di trasmissione:

- ▶ È la differenza tra la posizione effettiva della ruota condotta e quella che essa avrebbe se l'ingranaggio fosse perfettamente rigido.
- ▶ L'errore di trasmissione ha come armonica fondamentale quella di ingranamento e, in generale, contiene anche le armoniche superiori.
- ▶ A causa dell'errore di trasmissione, le forze trasmesse tra i denti non sono costanti ma variano con una frequenza pari a quella dell'errore di trasmissione.

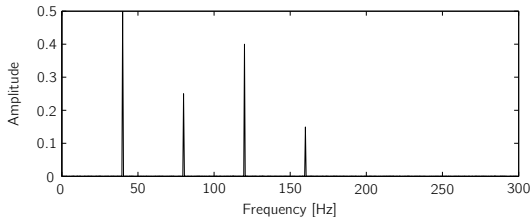
Cedevolezza dei denti: Modello del segnale

- ▶ Le forze di ingranamento eccitano le vibrazioni del carter
- ▶ Il segnale vibratorio misurato sul carter sarà caratterizzato dalla frequenza di ingranamento e dalle sue armoniche

$$x(t) = \sum_{n=0}^N X_n \cos(2\pi n f_m t + \phi_n) \quad f_m = z f_r$$



$$z = 20$$
$$f_r = 2 \text{ [Hz]}$$



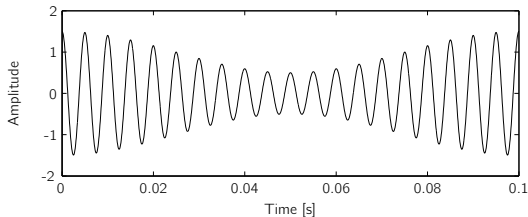
Effetti di modulazione

- ▶ I difetti degli ingranaggi sono associati a fenomeni di **modulazione**
- ▶ Il segnale di vibrazione risulta pertanto modulato in **ampiezza** e/o **fase**, a seconda del tipo di danno o malfunzionamento
- ▶ Si può distinguere tra **difetti distribuiti** (modulazione lenta) e **difetti concentrati** (modulazione locale)
- ▶ Difetti distribuiti che producono modulazioni d'ampiezza alla frequenza di rotazione sono:
 - ▶ Eccentricità
 - ▶ Imperfezione circolarità
 - ▶ Eccentricità degli alberi
- ▶ Gli errori di passo distribuiti lungo tutta la primitiva della ruota producono modulazioni "lente" di fase
- ▶ Difetti che producono modulazioni locali sono invece:
 - ▶ Denti rotti
 - ▶ Denti criccati
 - ▶ Denti sporgenti
- ▶ Generalmente difetti localizzati nei denti generano anche impulsi che vanno ad eccitare le frequenze di risonanza del carter

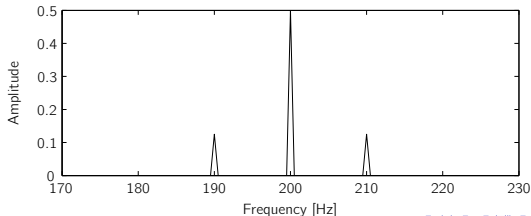
Modulazioni

- Un segnale modulato si presenta nella seguente forma:

$$\begin{aligned}x(t) &= [A + \epsilon A \cos(2\pi f_r t)] \cos(2\pi f_m t) \\ &= A \cos(2\pi f_m t) + \epsilon A \cos(2\pi f_r t) \cos(2\pi f_m t) \\ &= A \cos(2\pi f_m t) + \frac{\epsilon A}{2} \cos(2\pi(f_m + f_r)t) + \frac{\epsilon A}{2} \cos(2\pi(f_m - f_r)t)\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}f_m &= 200 \text{ [Hz]} \\ f_r &= 10 \text{ [Hz]}\end{aligned}$$



Modello del segnale dell'ingranamento difettoso

- ▶ In generale i difetti nelle ruote dentate producono delle modulazioni di ampiezza e/o di fase dove la portante é la frequenza di ingranamento e la modulante é la frequenza di rotazione. In aggiunta alcuni tipi di difetto generano impulsi che possono eccitare le frquenze naturali del carter

$$x(t) = \sum_{n=1}^N X_n [1 + a_n(t)] \cos[2\pi n f_m t + \phi_n + b_n(t)] + d(t, t_{imp}, X_{imp}, \sigma_{imp}, f_{imp})$$

$$a_n(t) = \sum_{m=1}^M A_{nm} \cos(2\pi m f_r t + \alpha_{nm})$$

$$b_n(t) = \sum_{m=1}^M B_{nm} \cos(2\pi m f_r t + \beta_{nm})$$

Demodulazione di ampiezza e fase

- ▶ Si filtra attorno ad un'armonica dell'ingranamento

$$x_n(t) = X_n[1 + a_n(t)] \cos[2\pi n f_m t + \phi_n + b_n(t)]$$

- ▶ Si calcola il segnale analitico del segnale filtrato

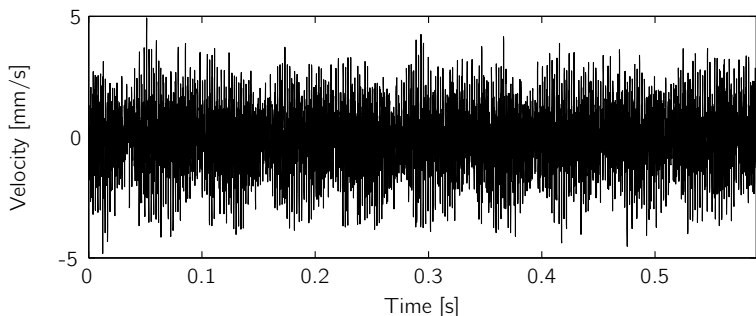
$$x_a(t) = X_n[1 + a_n(t)]e^{j[2\pi n f_m t + \phi_n + b_n(t)]}$$

$$a_n(t) = \frac{|x_a(t)|}{X_n} - 1 \quad b_n(t) = \angle(x_a(t)) - (2\pi n f_m t + \phi_n)$$

Tecniche di analisi del segnale per la diagnostica degli ingranaggi - 1

- ▶ Trasformata di Fourier
- ▶ Media Sincrona
- ▶ Demodulazione di ampiezza e fase
- ▶ Short-Time Fourier Transform

Tecniche di analisi del segnale per la diagnostica degli ingranaggi - 2



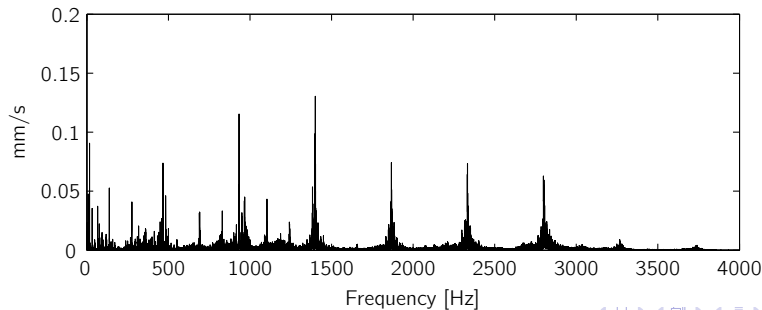
$$z_1 = 28$$

$$z_2 = 55$$

$$v_p = 1000 \text{ rpm}$$

$$f_r = 16.67 \text{ Hz}$$

$$f_m = 466.67 \text{ Hz}$$



$$f_{m1} = 466.67 \text{ Hz}$$

$$f_{m2} = 933.5 \text{ Hz}$$

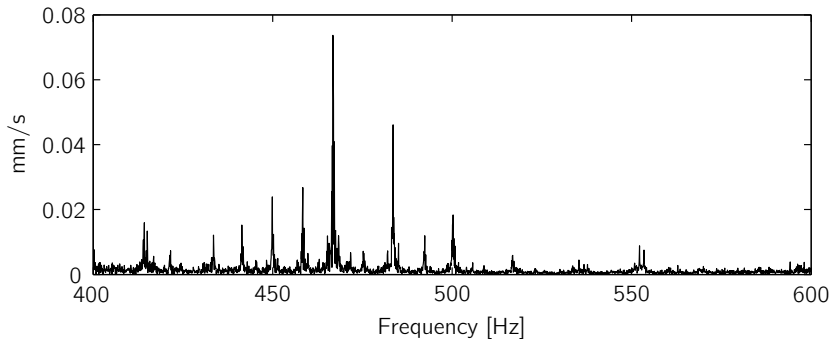
$$f_{m3} = 1400.3 \text{ Hz}$$

$$f_{m4} = 1867 \text{ Hz}$$

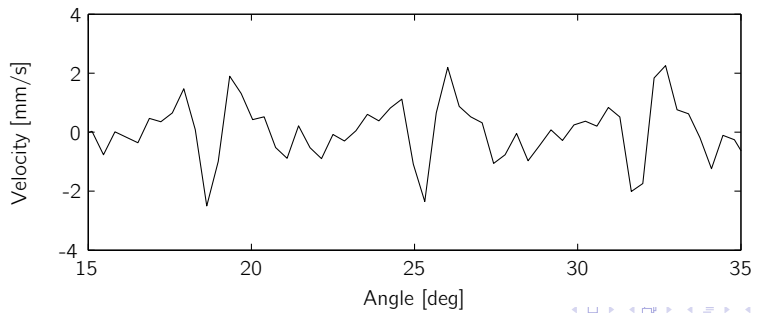
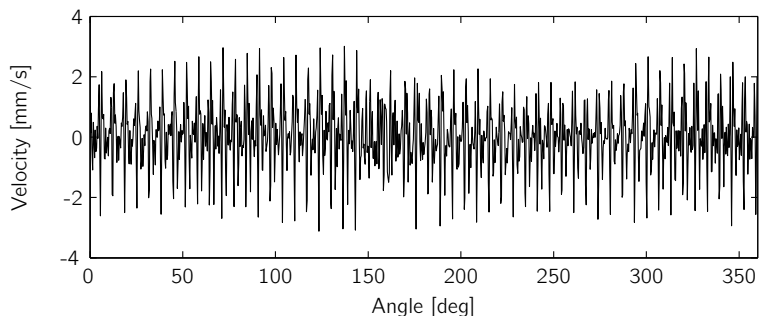
$$f_{m5} = 2333.8 \text{ Hz}$$

$$f_{m6} = 2800.6 \text{ Hz}$$

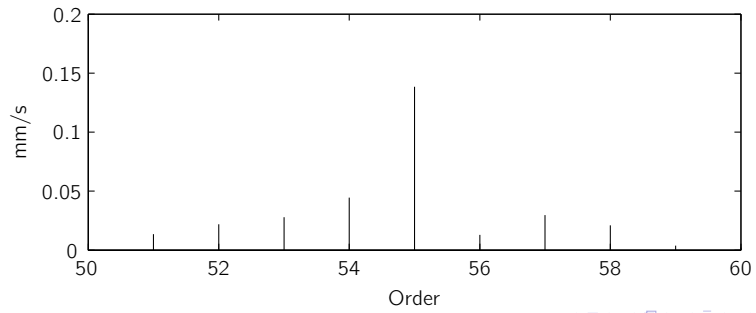
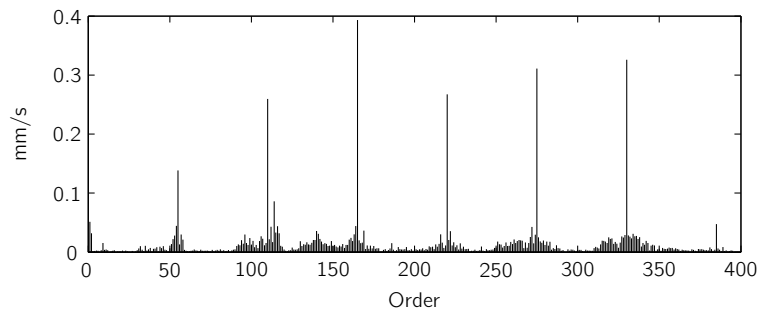
- ▶ Sono presenti bande laterali ad una distanza di 8.4 Hz



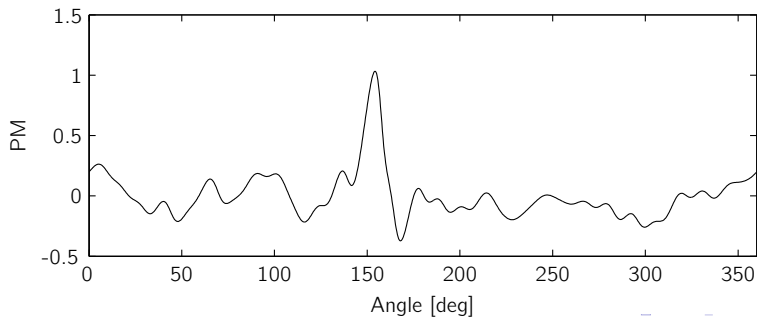
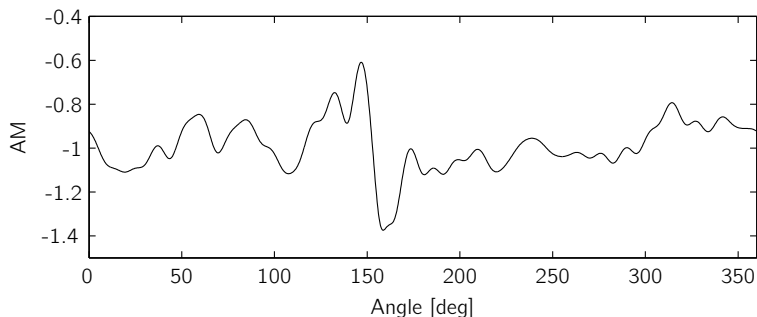
Tecniche di analisi del segnale per la diagnostica degli ingranaggi - 4



Tecniche di analisi del segnale per la diagnostica degli ingranaggi - 5



Tecniche di analisi del segnale per la diagnostica degli ingranaggi - 6



STFT; Nw=128; Noverlap=96; K = 29

