

# Diagnostica ruote dentate

G. D'Elia

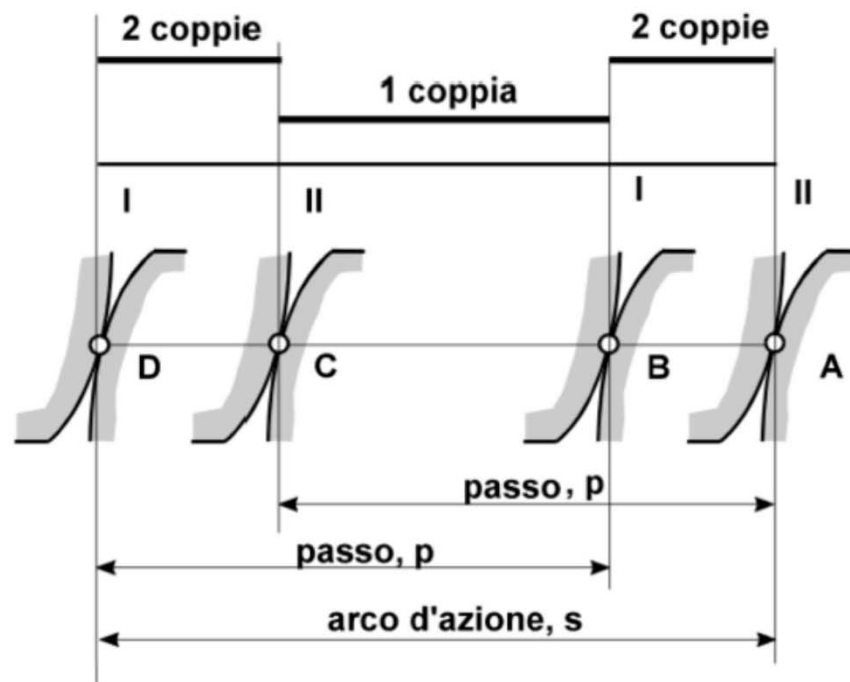
# Principali difetti e cause di malfunzionamento

<b>Difetto</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Cause</b>
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'intero dente.	Fenomeni di fatica, sovraccarichi.

- ❑ Esistono malfunzionamenti che non portano necessariamente al guasto e all'arresto ma che comunque risultano dannosi.

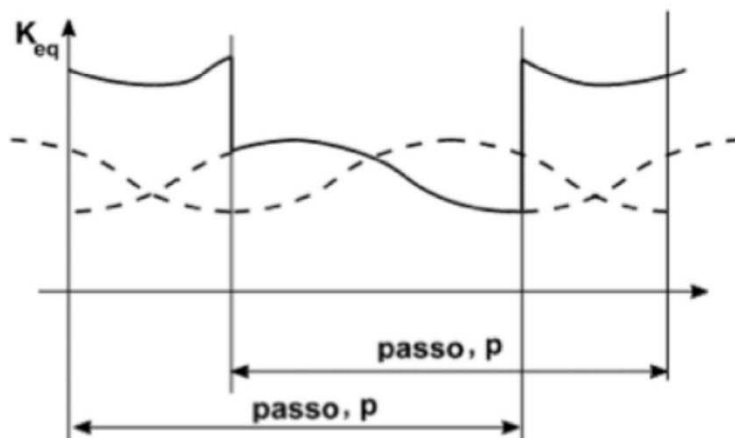
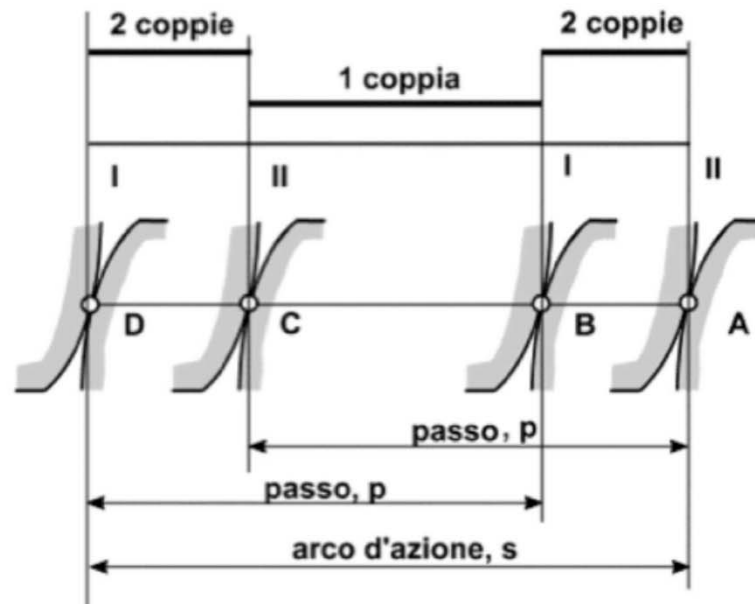
<b>Malfunzionamento</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Cause</b>
Eccentricità	Assi geometrici della ruota e dell'albero non coincidenti. Imperfetta circolarità della ruota.	Errori di costruzione o di montaggio.
Perdite di contatto tra ruota-cuscinetto-albero	Eccessivo gioco tra ruota e albero o tra cuscinetto 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.
Machining signes	Rottura dell'intero dente.	Metodo di generazione e costruzione.

# Rigidezza di ingranamento - 1



- ▶ Per la continuità dell'ingranamento il fattore di ricoprimento  $\epsilon$  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 levolvente.
- ▶ 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 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

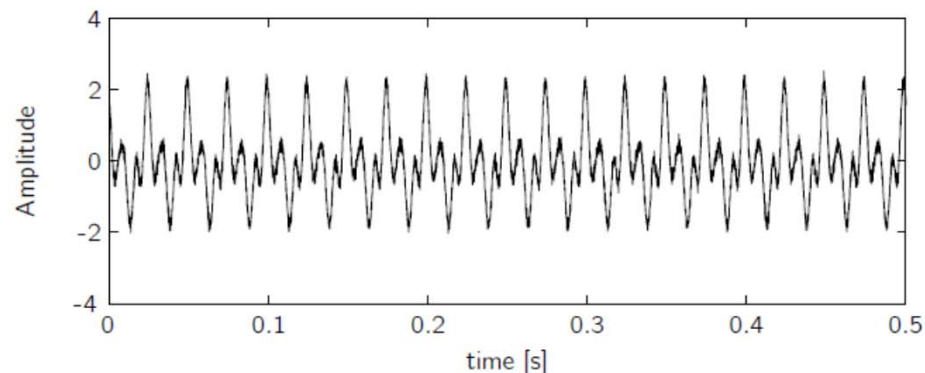
Errore di trasmissione:

- ▶ É 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.

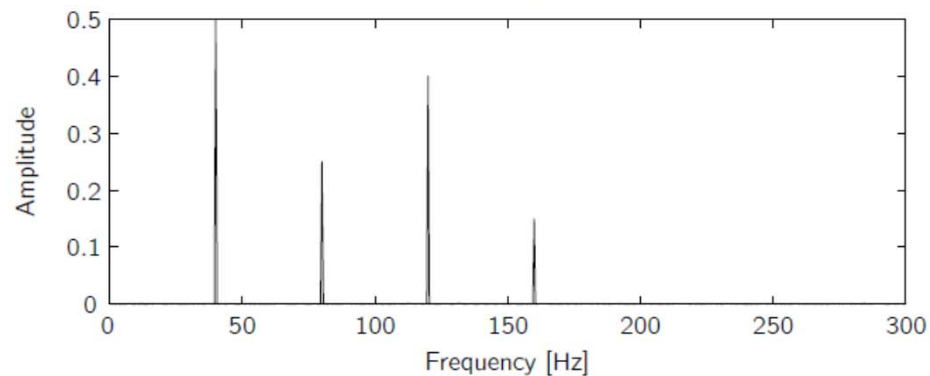
# Cedevolezza dei denti – Modello del segnale

- ▶ 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

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



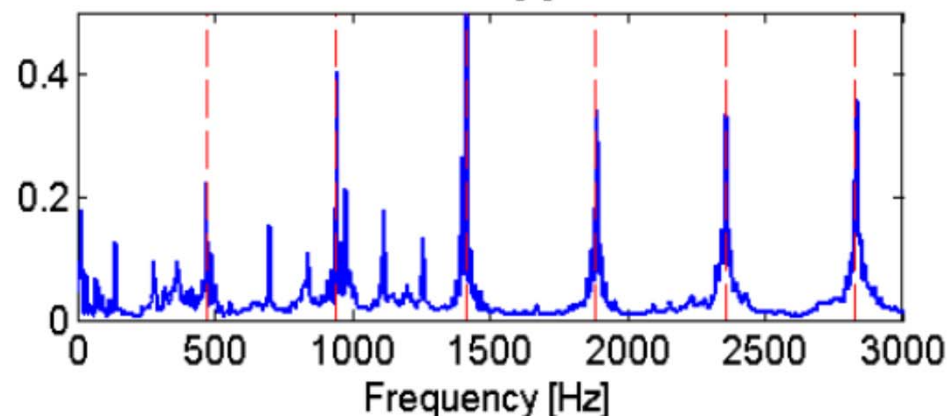
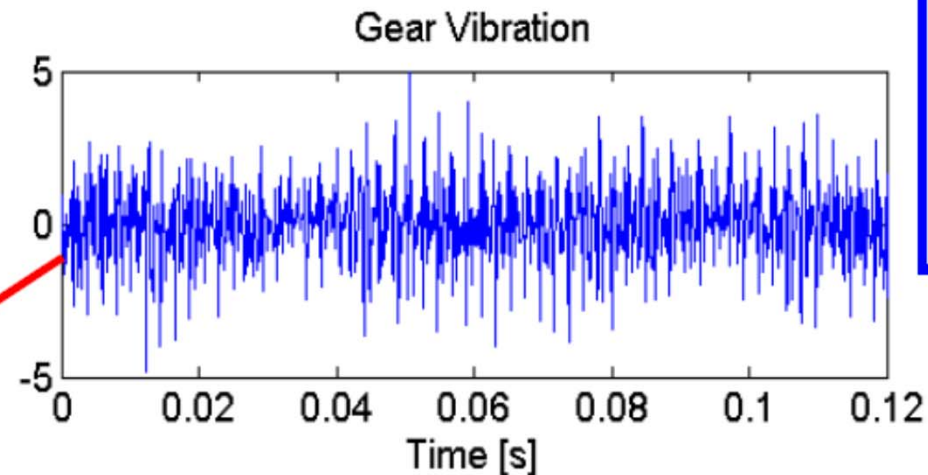
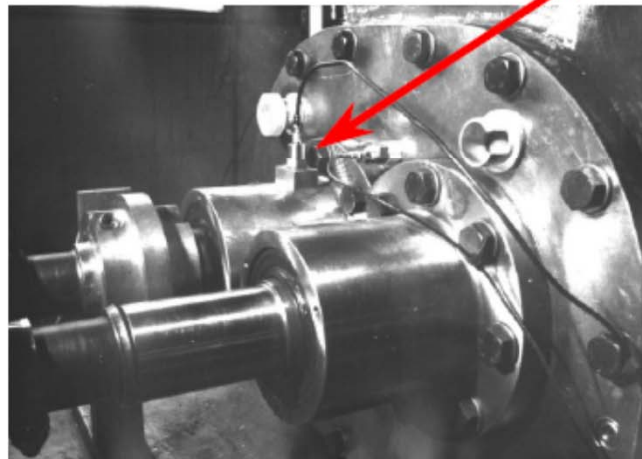
$$z = 20$$
$$f_r = 2 \text{ [Hz]}$$



# Ingranaggio sano: caso reale

□ Segnale vibratorio (velocità) misurato sulla carcassa di un riduttore in direzione RADIALE (*rdec62*).

- Pignone  $Z_1 = 28$
- Ruota  $Z_2 = 55$
- $n_1 = 1000$  rpm
- $f_1 = n_1/60 = 16.67$  Hz
- $f_g = f_1 * z_1 = 466.67$  Hz



Armoniche  
ingranamento  
[Hz]

1x) 466.67

2x) 933.33

3x) 1400.00

4x) 1866.67

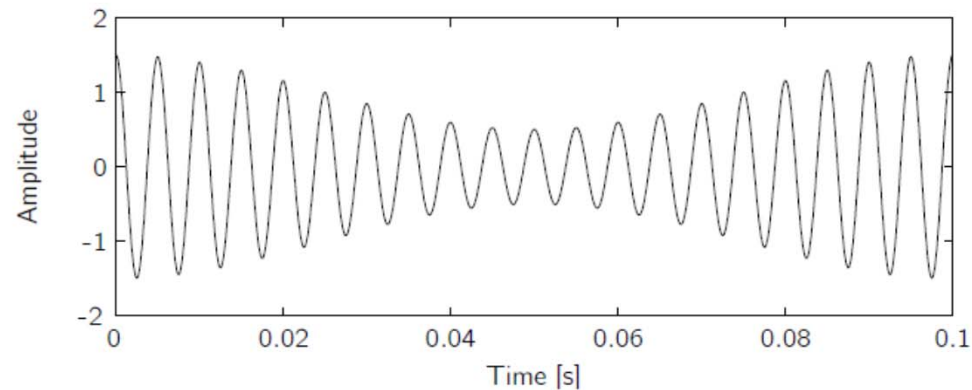
...



# Modulazioni

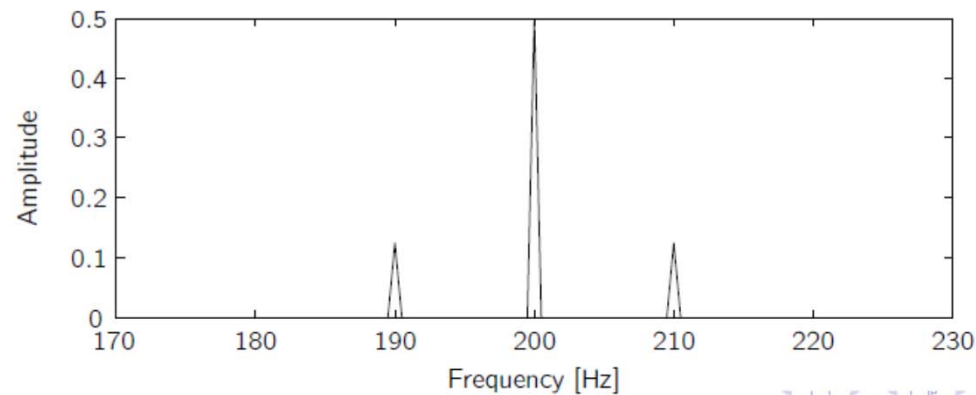
- Un segnale modulato si presenta nella seguente forma:

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



$$f_m = 200 \text{ [Hz]}$$

$$f_r = 10 \text{ [Hz]}$$



# Effetti di modulazione – difetti distribuiti

❑ I seguenti difetti producono nel segnale vibratorio effetti simili:

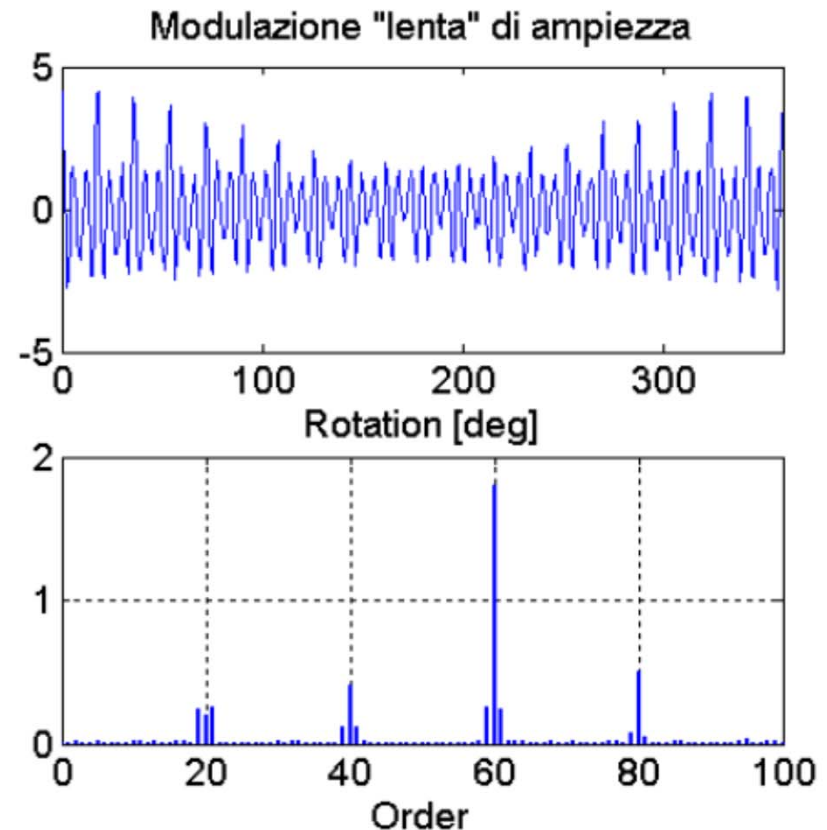
- Eccentricità
- Imperfetta circolarità
- Flessione degli alberi

❑ Si tratta in particolare di **modulazione di ampiezza** alla frequenza di rotazione.

❑ Nel dominio di frequenza lo spettro di vibrazione presenta picchi alla frequenza di ingranamento ed alle sue armoniche, accompagnati da alcune (poche) **bande laterali**.

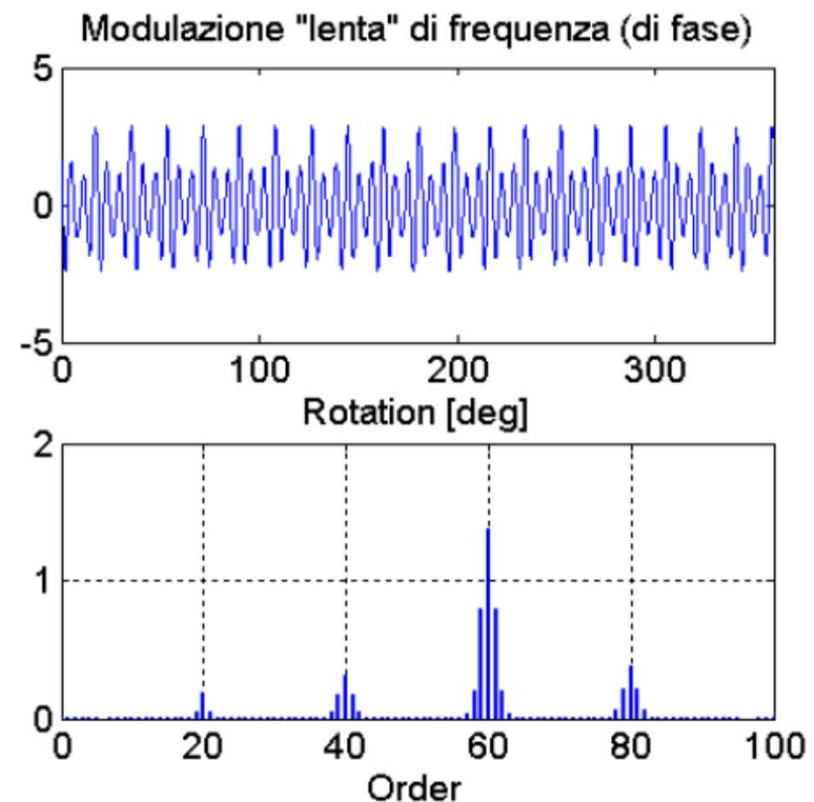
❑ La **spaziatura tra le bande laterali** è pari alla frequenza di rotazione della ruota difettosa.

ESEMPIO - Frequenza di ingranamento, armoniche e bande laterali ( $Z=20$ )



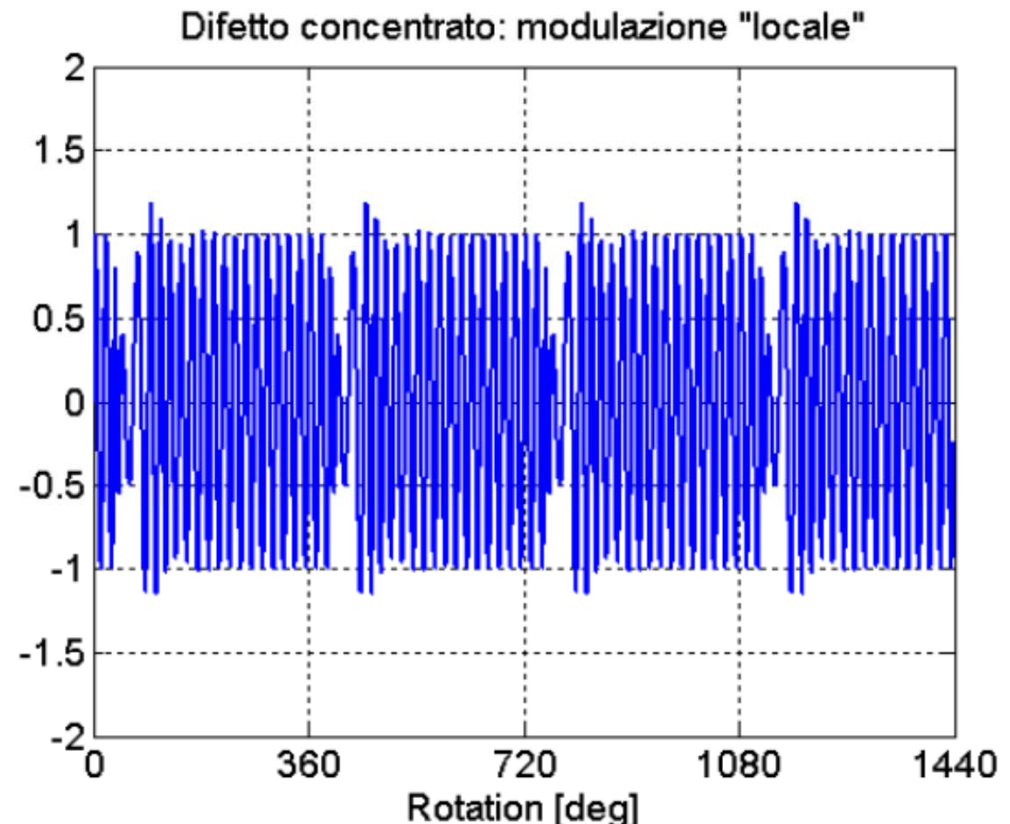
# Effetti di modulazione – difetti distribuiti

- ❑ Si possono avere anche fenomeni di modulazione “lenta” della frequenza (***modulazione di fase***).
- ❑ Pensiamo ad esempio al caso di errori nel passo di dentatura distribuiti lungo tutta la primitiva della ruota.
- ❑ Si hanno rallentamenti e accelerazioni a cui corrispondono fenomeni di modulazione.
- ❑ La ***frequenza modulante*** è quella di rotazione della ruota difettosa.
- ❑ Nel dominio di frequenza lo spettro di vibrazione presenta picchi alla frequenza di ingranamento ed alle sue armoniche, accompagnati da alcune (poche) ***bande laterali***.
- ❑ La ***spaziatura tra le bande laterali*** è pari alla frequenza di rotazione della ruota difettosa.



# Effetti di modulazione – difetti localizzati

- ❑ L'effetto di modulazione può essere generato anche da difetti concentrati nella ruota come, ad esempio, denti prominenti, denti criccati, denti rotti, ...
- ❑ In tali casi si hanno rallentamenti od accelerazioni repentine, o addirittura urti, a cui corrispondono brusche variazioni sia nell'ampiezza della forza di ingranamento, che nella velocità di rotazione.
- ❑ Ciò si traduce in una **modulazione "locale"** di ampiezza e frequenza (fase) del segnale di vibrazione.





# Effetti di modulazione – difetti localizzati

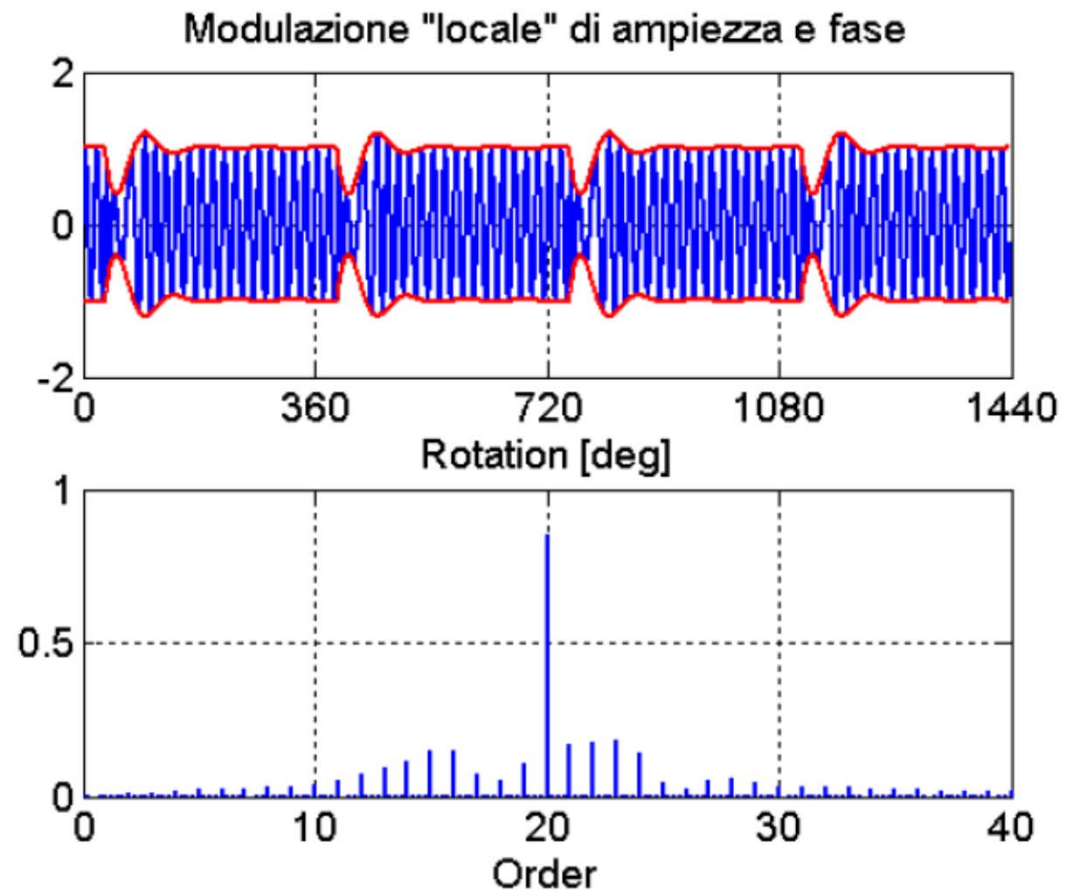
❑ Ciò si traduce in una **modulazione "locale"** di ampiezza e frequenza (fase) del segnale di vibrazione.

❑ La **frequenza modulata** è quella di ingranamento (con le sue armoniche).

❑ La **frequenza modulante** è quella di rotazione della ruota difettosa.

❑ Nel dominio di frequenza il fenomeno si presenta in una ampia serie di **bande laterali** con distribuzione asimmetrica.

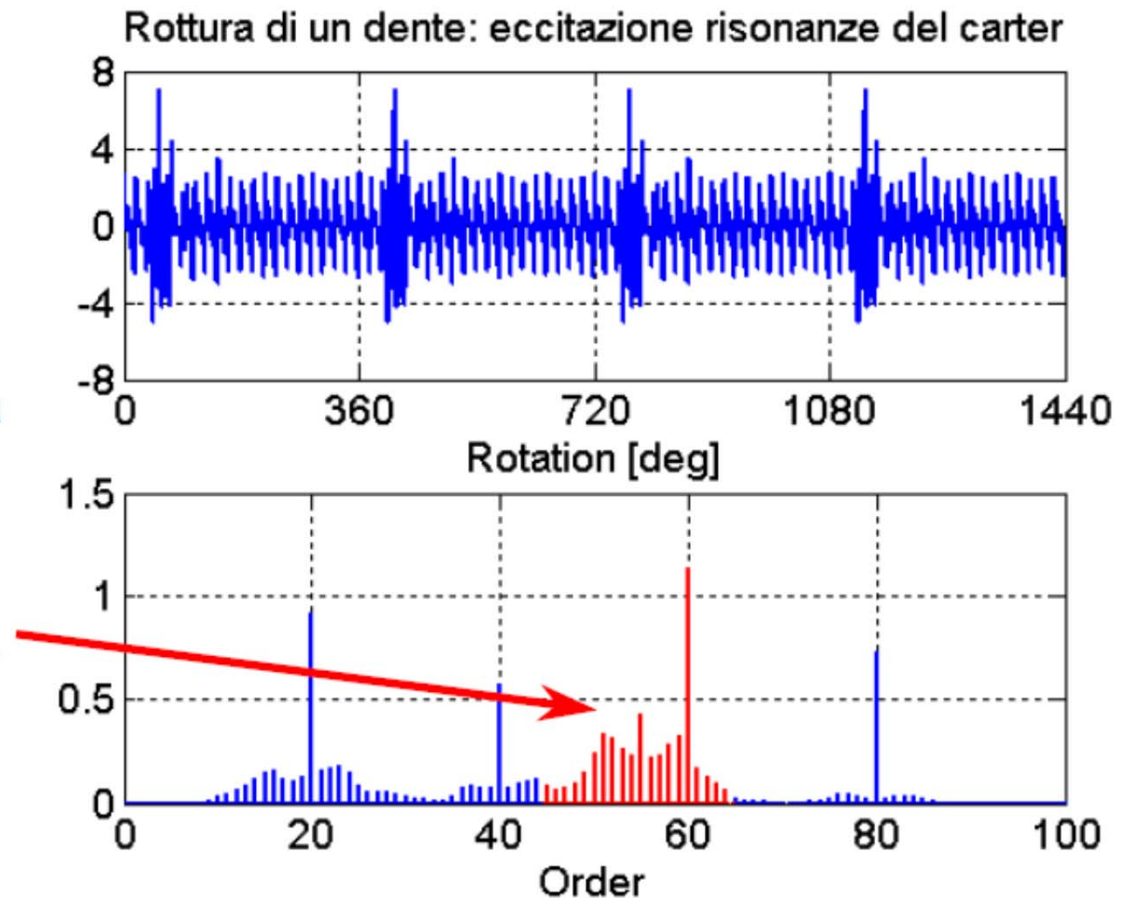
❑ La **spaziatura tra le bande laterali** è pari alla frequenza di rotazione della ruota difettosa.





# Effetti di modulazione – difetti localizzati

- ❑ Un difetto concentrato come la rottura di un dente causa una perdita di continuità nel contatto ed una brusca variazione della forza trasmessa.
- ❑ Una sorta di eccitazione impulsiva è applicata alle ruote ed al carter.
- ❑ L'impulso può eccitare le risonanze del carter (frequenza naturali).
- ❑ Nel dominio di frequenza la vibrazione è caratterizzata da una famiglia di bande piuttosto ampia nell'intorno della **risonanza del carter**.



# Ingranaggio difettoso: modello del segnale

- 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

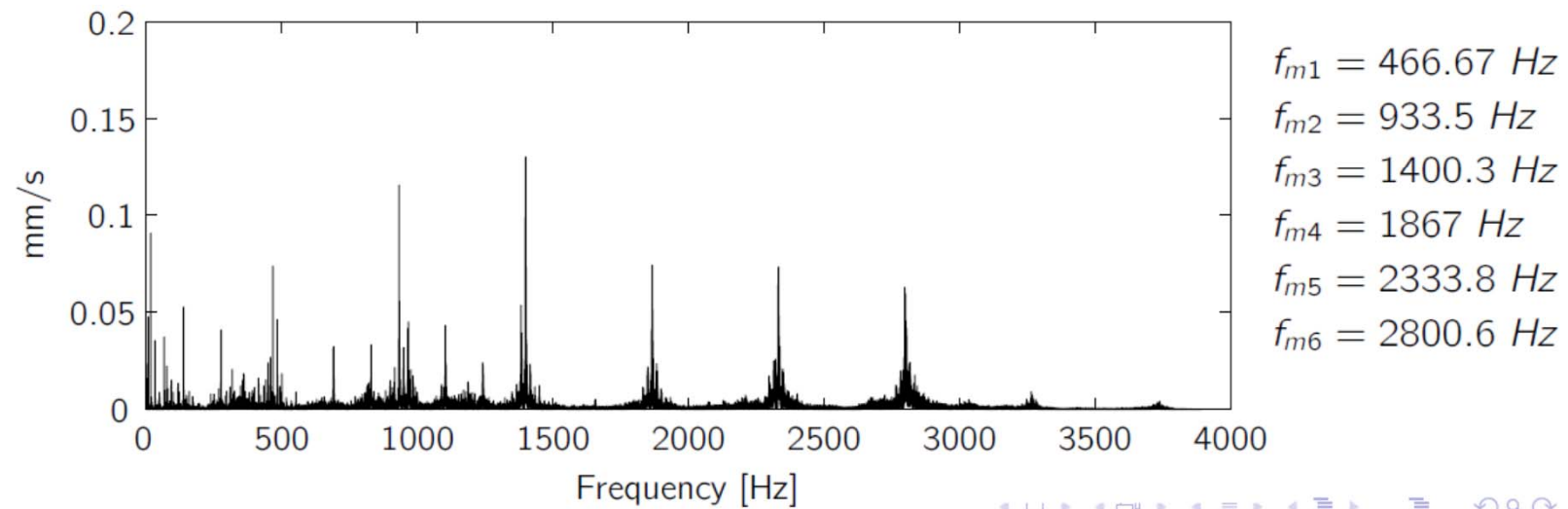
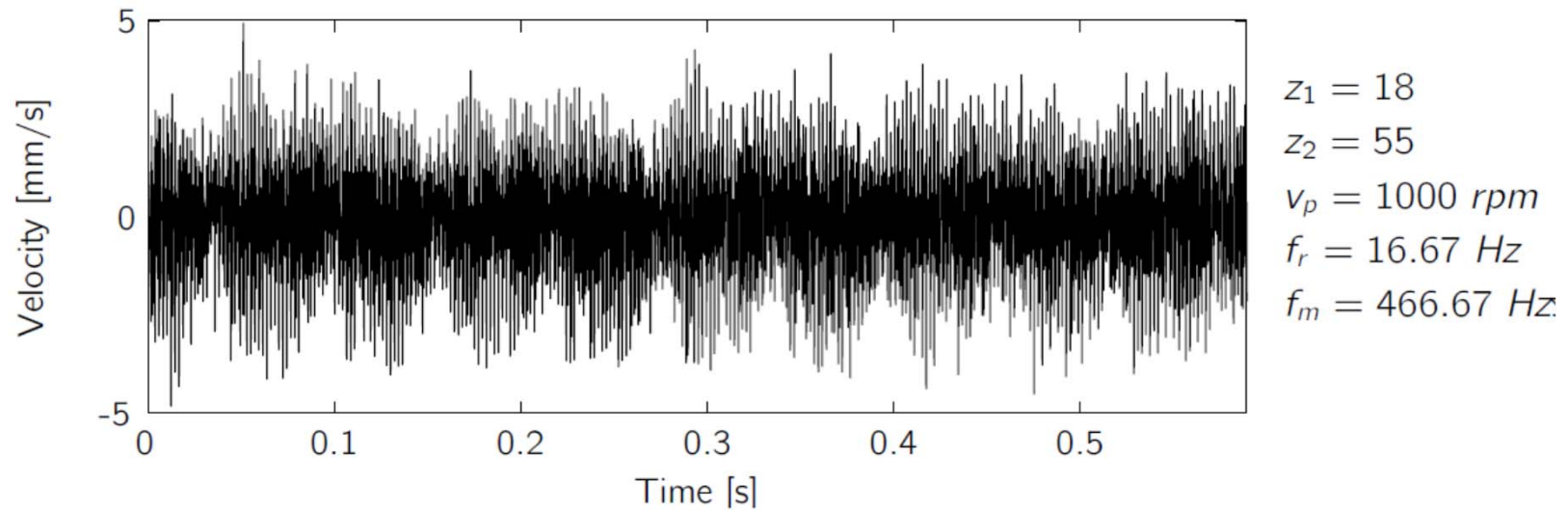
$$x_n(t) = X_n[1 + a_n(t)] \cos[2\pi n f_m t + \phi_n + b_n(t)]$$

- Si calcola il segnale analitico del segnale filtrato

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

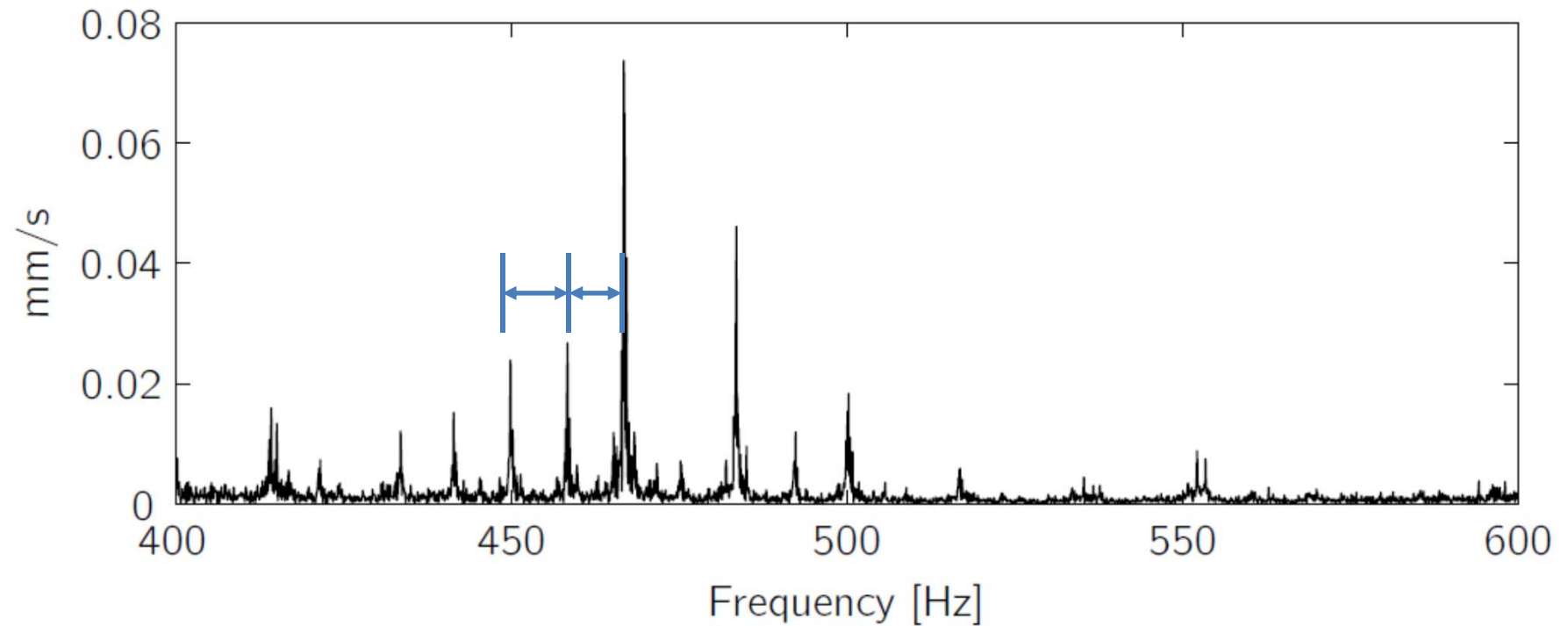
$$a_n(t) = \frac{|x_a(t)|}{X_n} - 1 \quad b_n(t) = \angle(x_a(t)) - (2\pi n f_m t + \phi_n)$$

# Caso reale



# Caso reale: bande laterali

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



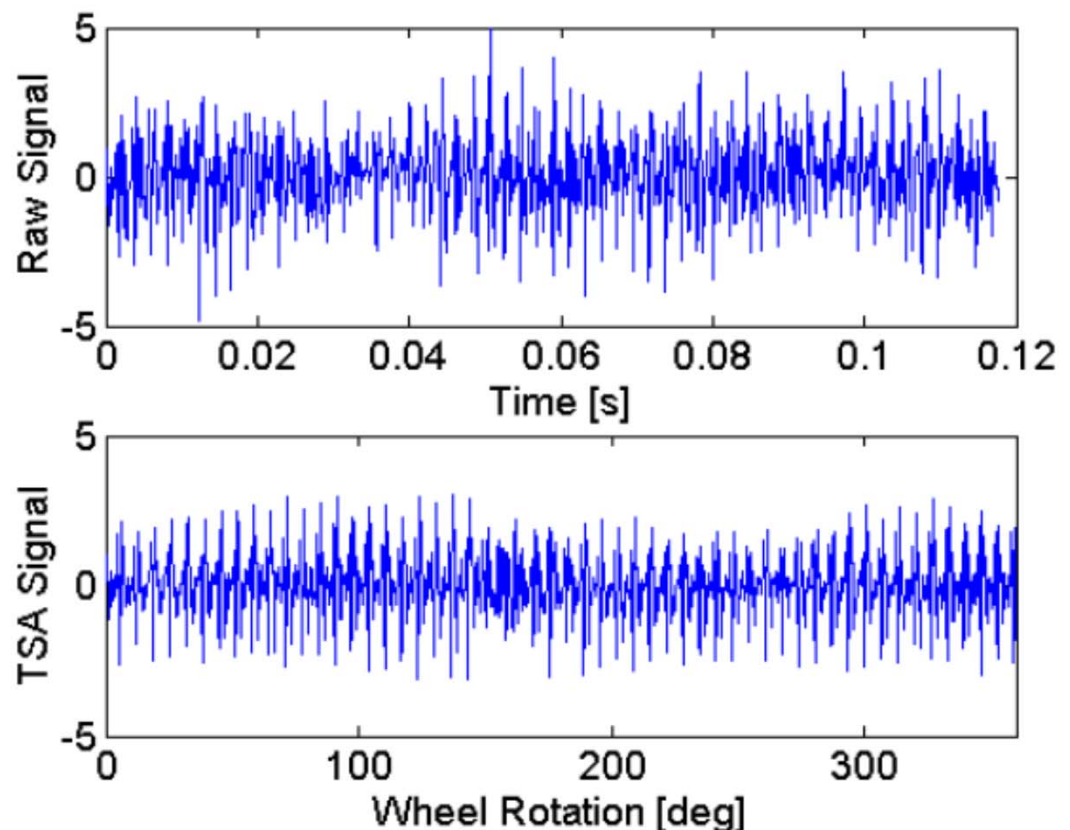


# Media sincrona

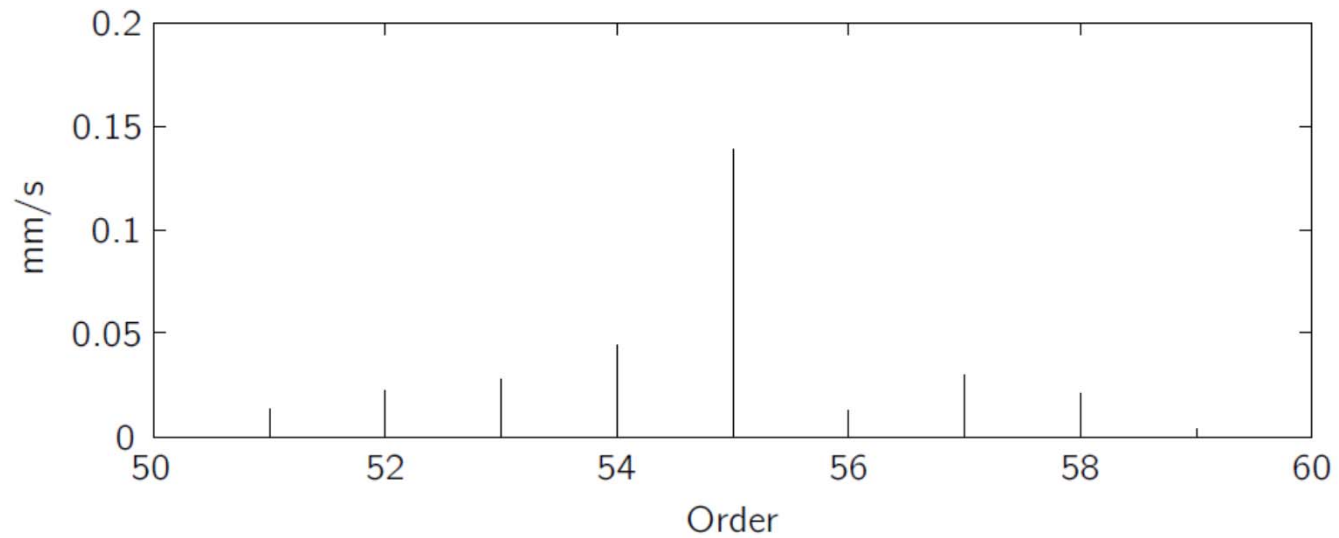
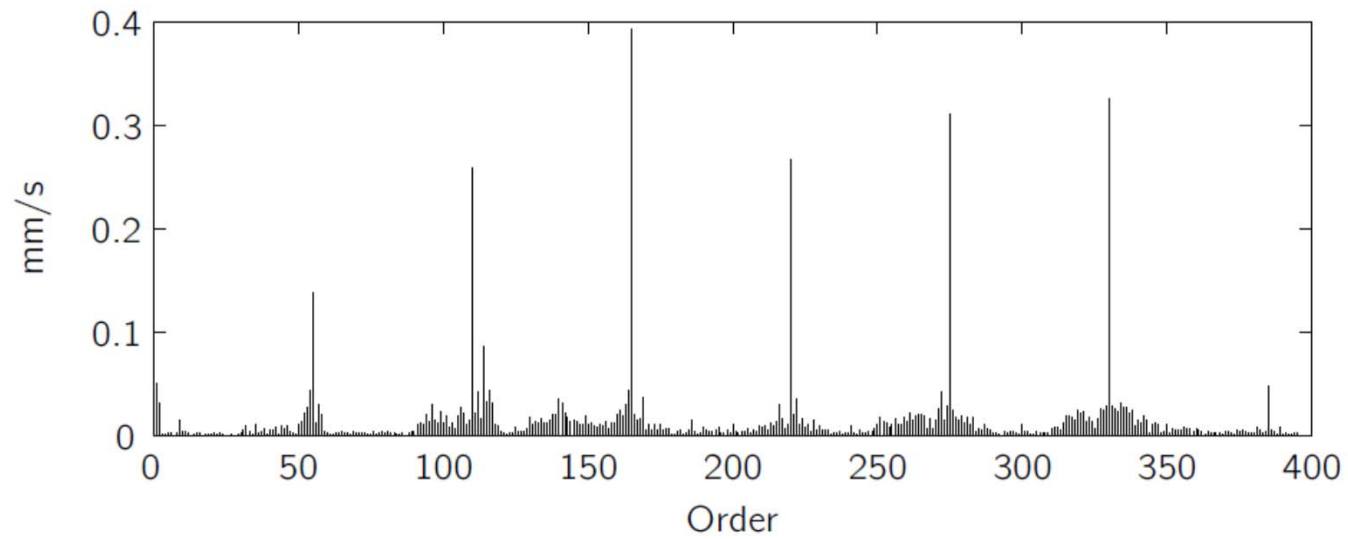
- Dati ingranaggio:
  - Pignone  $Z1 = 28$
  - Ruota  $Z2 = 55$
  - $n_1 = 1000$  rpm
  - $f_g = f_1 * z_1 = (n_1/60) * z_1 = 466.67$  Hz

- Segnale vibratorio (velocità) misurato sulla carcassa di un riduttore in direzione radiale (*rdec62*).
- Il segnale di vibrazione in direzione radiale (*rdec62*) è stato mediato sincronamente con la Ruota 2 (segnale *r62\_i*).

- La media sincrona elimina il rumore e il contributo di tutte le componenti non sincrone con la ruota.



# Media sincrona



# Il segnale residuo

❑ Detto “**Regolare**” il segnale dell’ingranaggio privo di difetti, il segnale residuo rappresenta lo scostamento dal segnale “regolare” dovuto agli effetti di modulazione.

❑ Si definisce pertanto **Segnale Residuo** la differenza:

$$x_R(t) = x(t) - x_0(t)$$

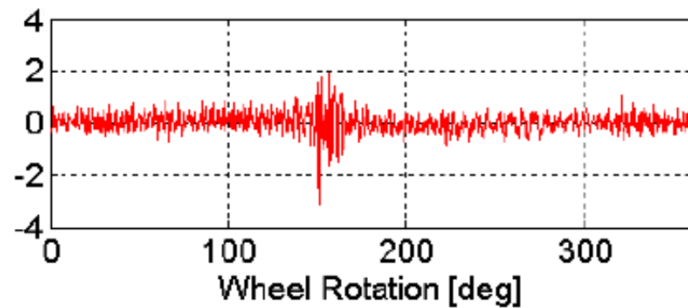
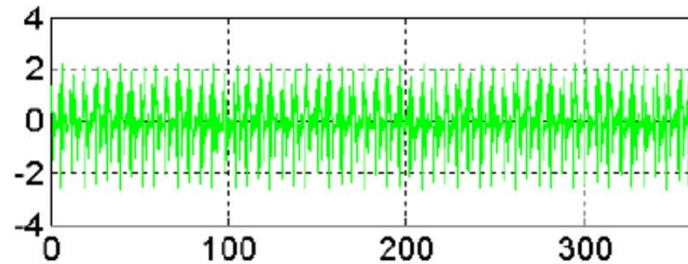
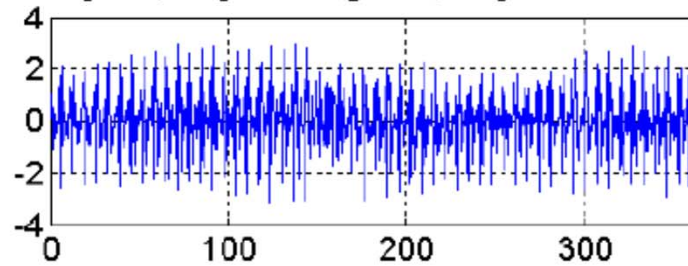
❑ Per calcolare il segnale residuo occorre:

- Effettuare una media sincrona del segnale di vibrazione;
- Calcolarne lo spettro;
- Eliminare dallo spettro della media sincrona la frequenza di ingranamento e le sue armoniche;
- Ritornare nel dominio di partenza operando una trasformata inversa.

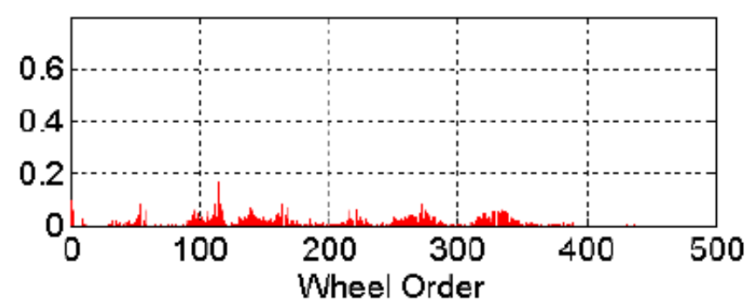
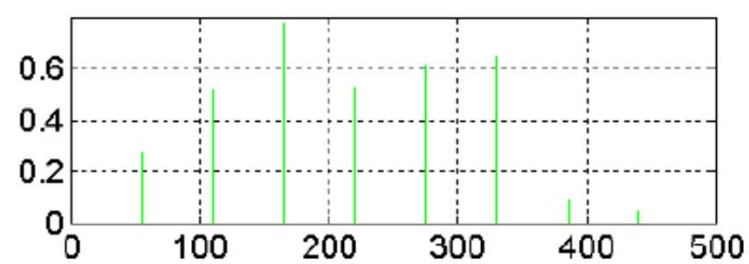
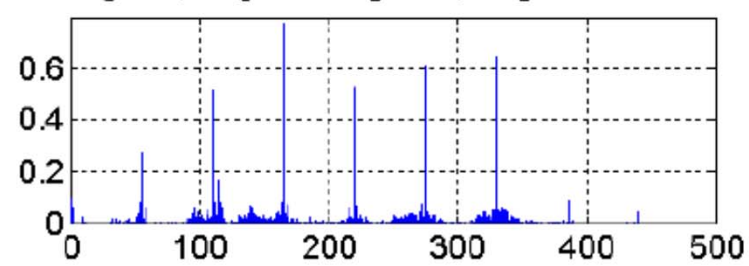
❑ Il segnale residuo ben si presta per il monitoraggio dello stato di salute poiché, per sua definizione, è molto sensibile alla presenza dei difetti (più della media sincrona).

# Segnale residuo

Segnale, Segnale Regolare, Segnale Residuo



Segnale, Segnale Regolare, Segnale Residuo

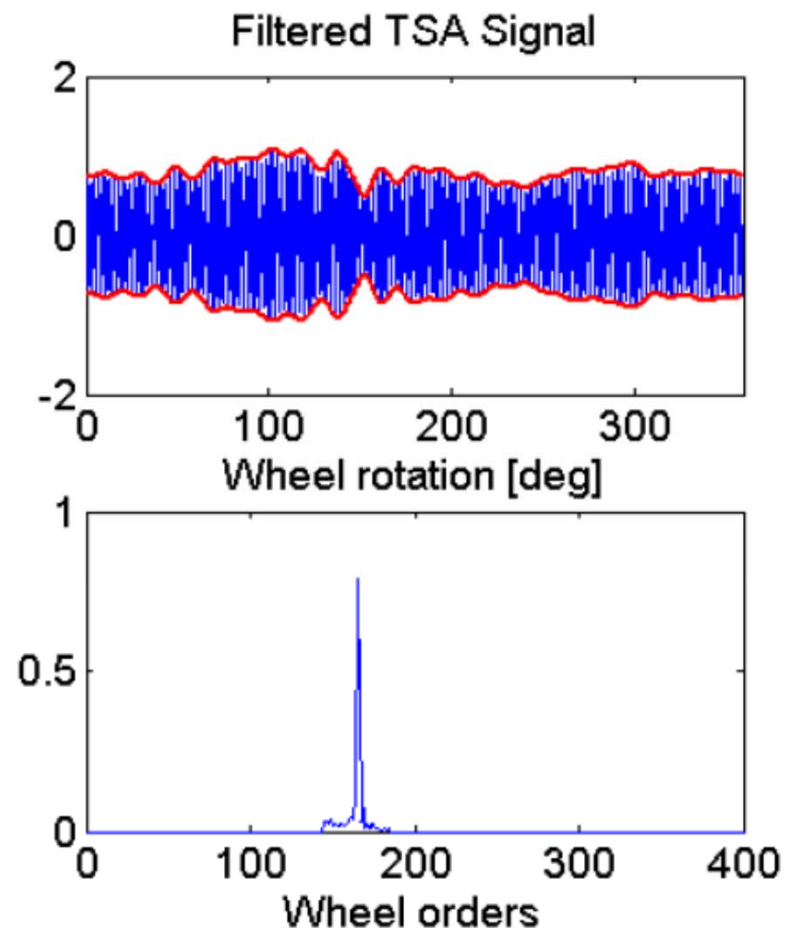
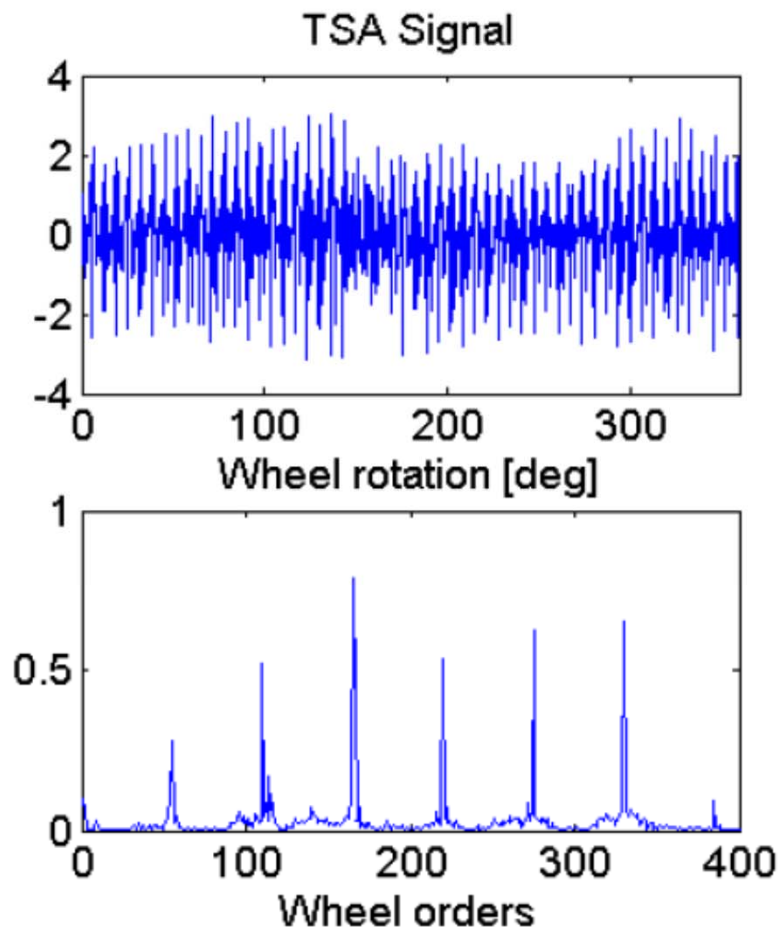


Valori del kurtosis	
Segnale	3.44
Segnale regolare	3.37
Segnale residuo	9.35

# Demodulazione di ampiezza e fase

☐ Si lavora sulla media  
sincrona del segnale.

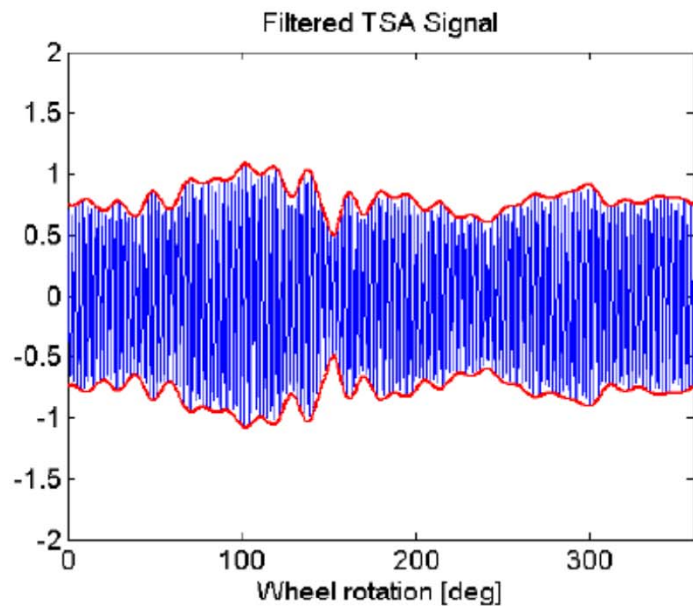
☐ Si filtra il segnale con filtro passa-banda  
attorno ad una armonica di ingranamento.





# Demodulazione di ampiezza e fase

- Si estraggono dal segnale filtrato le funzioni modulazione di ampiezza e fase.



- Modulazione di ampiezza e fase locali: probabile cricca in un dente.

