

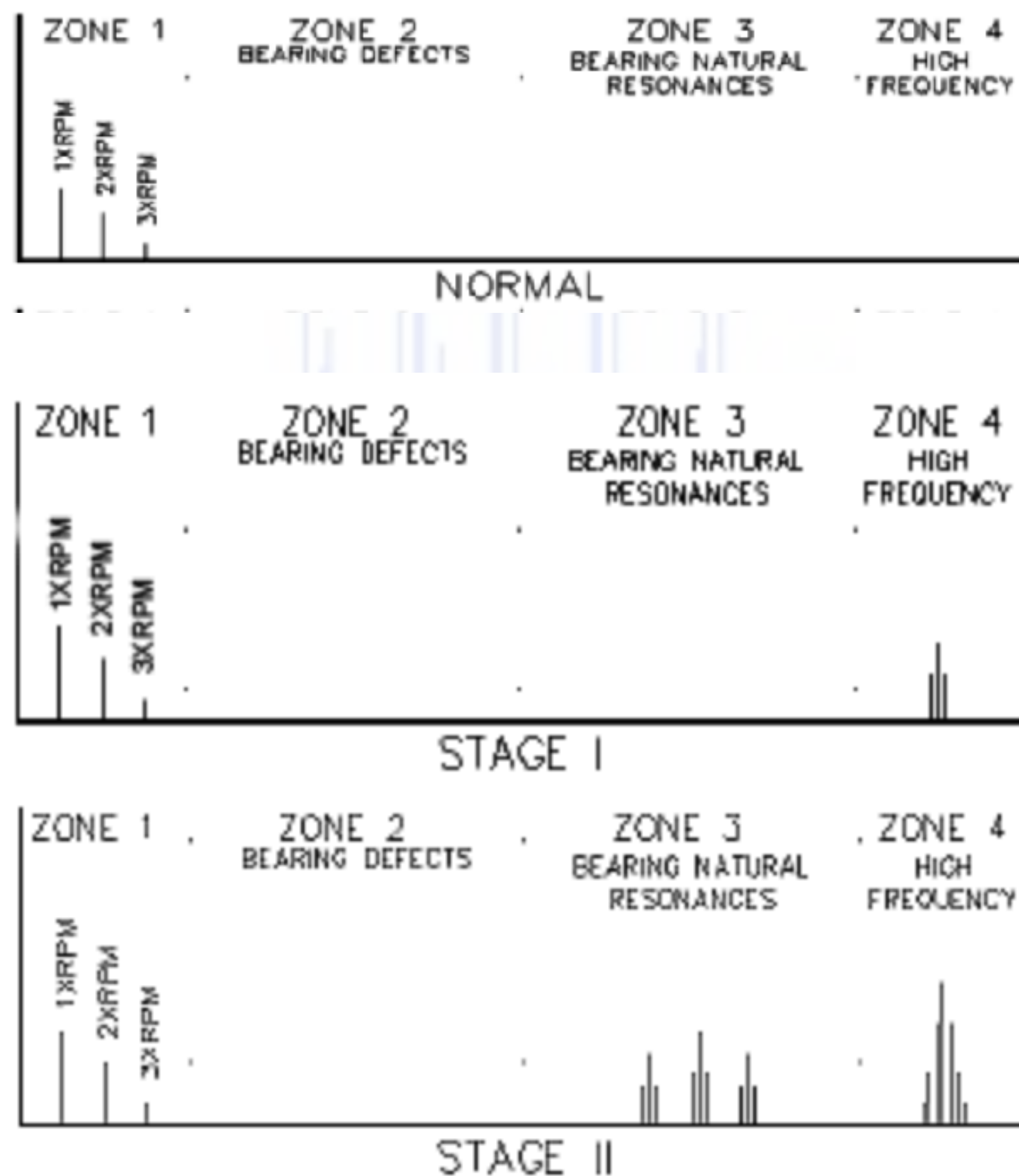
meccanica delle vibrazioni

laurea magistrale  
ingegneria meccanica

parte 6.2  
Manutenzione e Diagnosi

Il percorso è tracciato.. da sensore allo spettro,  
Cosa cambia nel tempo?

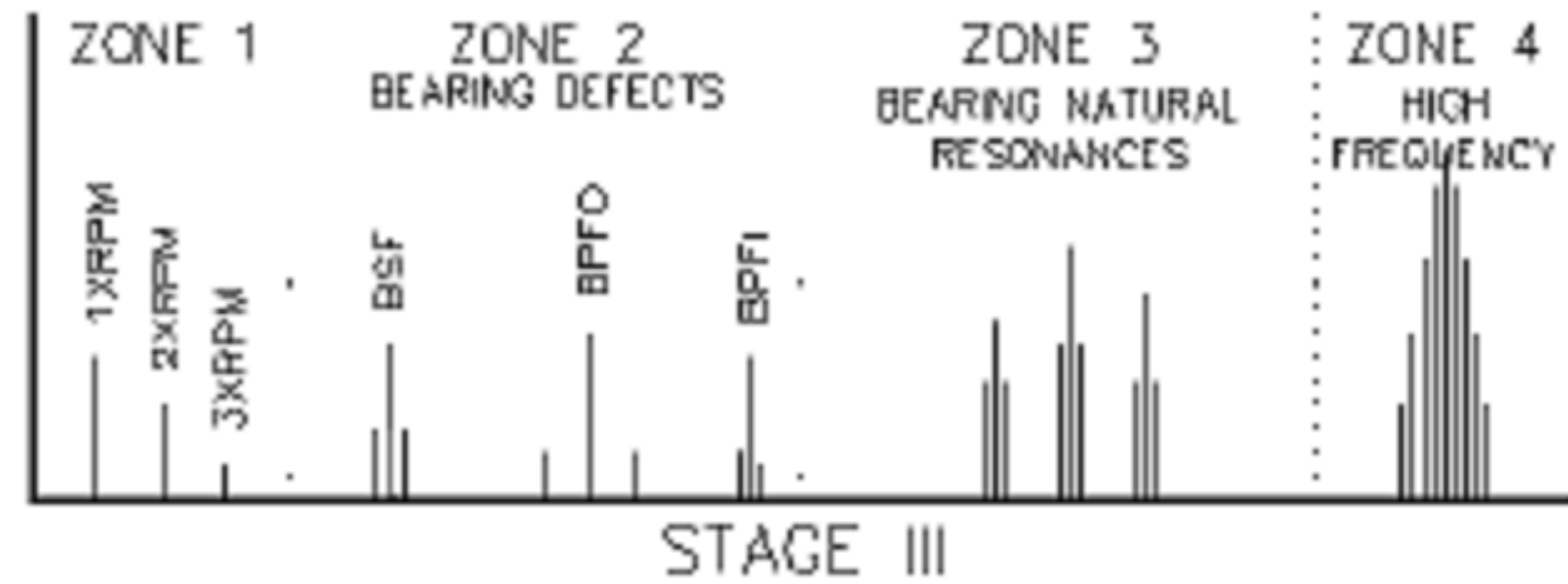
Ci sono diversi livelli di danneggiamento ciascun caratterizzato da tracce spettrali differenti



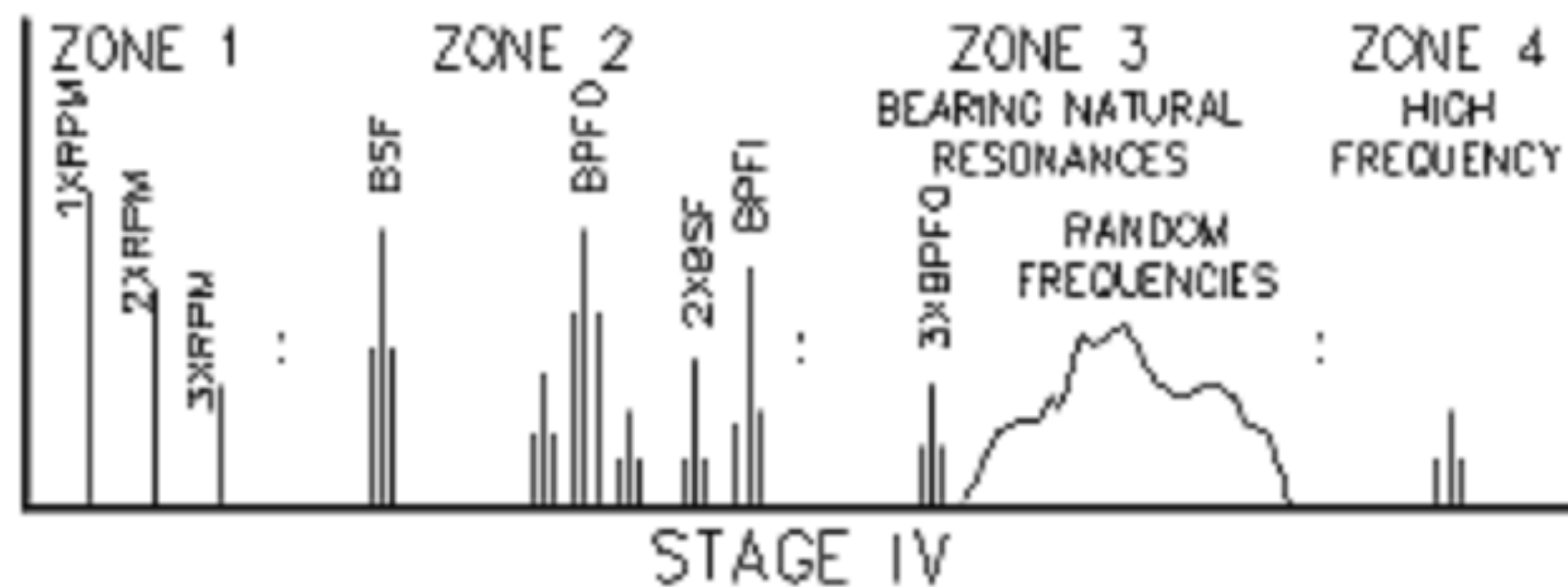
In condizioni di funzionamento normale  
ci sono solo le componenti in frequenza della macchina  
(c'è sempre un minimo di squilibrio, disallineamento,...)

Dopo un po' appaiono componenti ad altissima frequenza  
rilevabili solo con sensori agli ultrasuoni.  
Una ispezione sui cuscinetti non rileverebbe danni di sorta

Successivamente appaiono le frequenze naturali dei cuscinetti  
cominciano a "cantare"  
Una analisi sui cuscinetti rileverebbe dei giochi  
e dei minimi danni



Appaiono le frequenze di danneggiamento caratteristiche con le loro armoniche e modulazioni, cresce la parte ad altissimi frequenza  
 Una analisi sui cuscinetti rileverebbe danni evidenti



Poco prima di una rottura catastrofica aumentano le frequenze di macchina, aumentano il numero di armoniche e modulazioni, i giochi diventano ampi ed le frequenze fondamentali si confondono in una zona molto ampia.  
 L'altissima frequenza ha una diminuzione di ampiezza evidente

L'analisi dei cuscinetti non serve più..  
 è necessaria una sostituzione immediata!

..ma cosa si può monitorare, con sufficiente accuratezza e ripetibilità con l'analisi dei segnali vibrazionali nel dominio della frequenza?

..ecco una lista dei più comuni problemi analizzabili

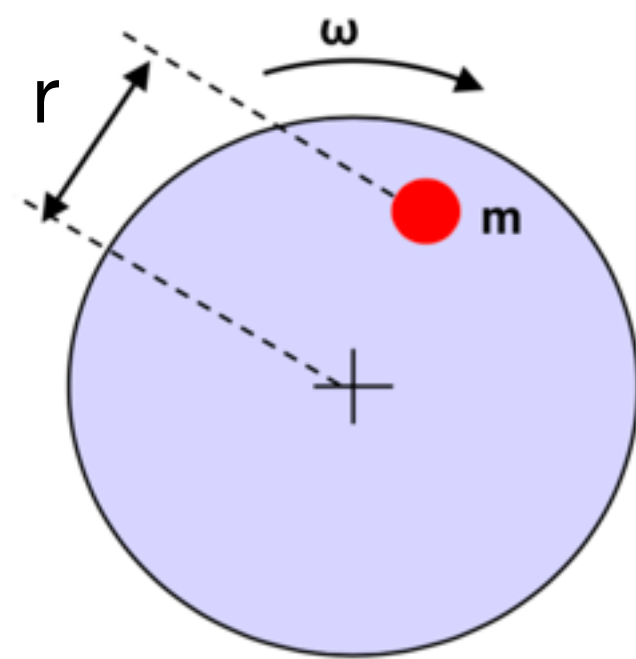
- Unbalance
- Misalignment
- Bent Shaft
- Looseness
- Resonances
- Journal Bearing
- Rolling Bearing
- Blades&Vanes
- Hydraulic/aerodynamic force
- Belt drive
- Gear
- Electrical

- Cavitation*
- Shaft crack*
- Rotor rub*

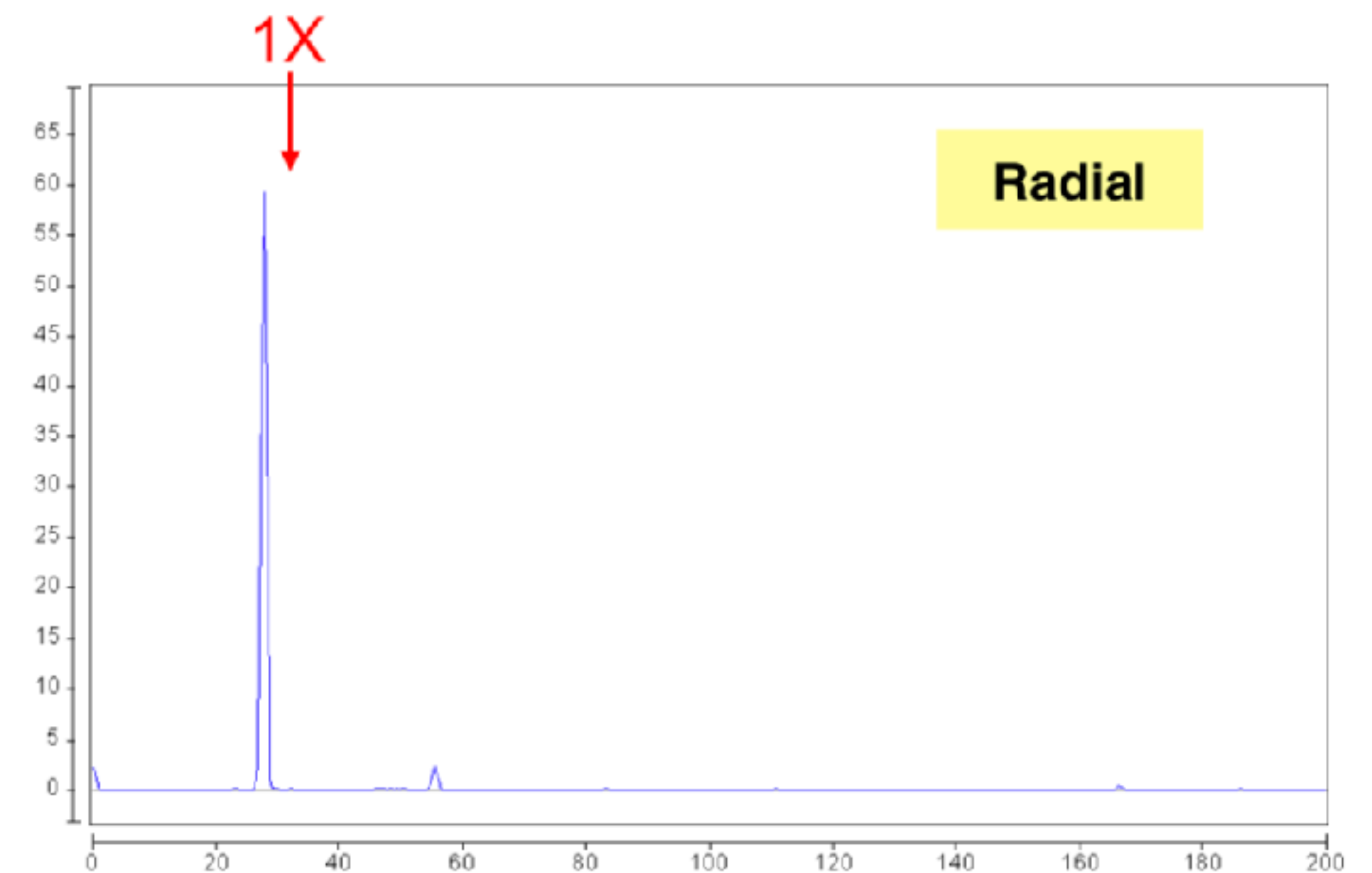
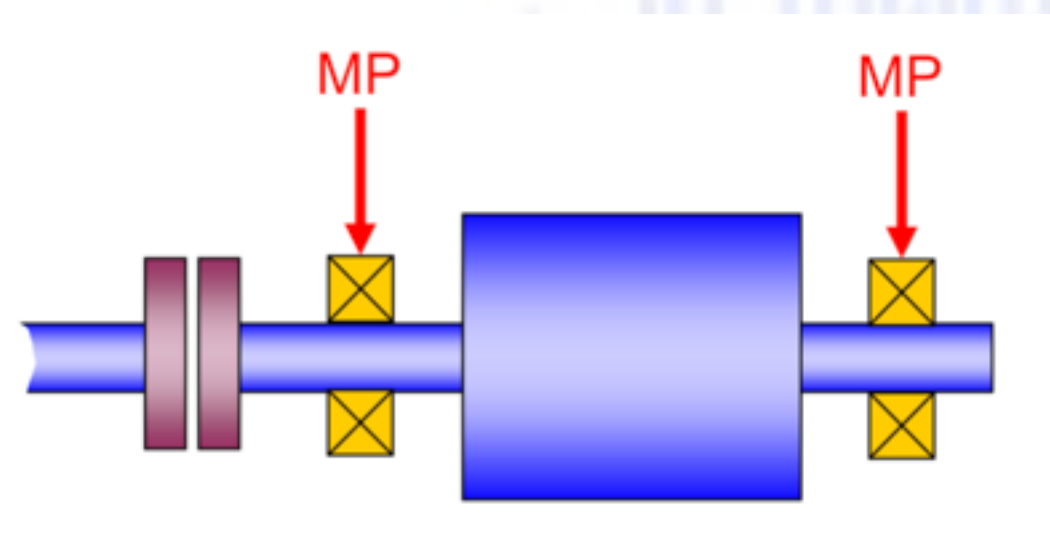


**Squilibrio..** ogni rotore ha sempre un certo quantitativo di squilibrio residuo. questo genera una forza radiale  $F$  appare come una componente 1x con dominante in direzione radiale

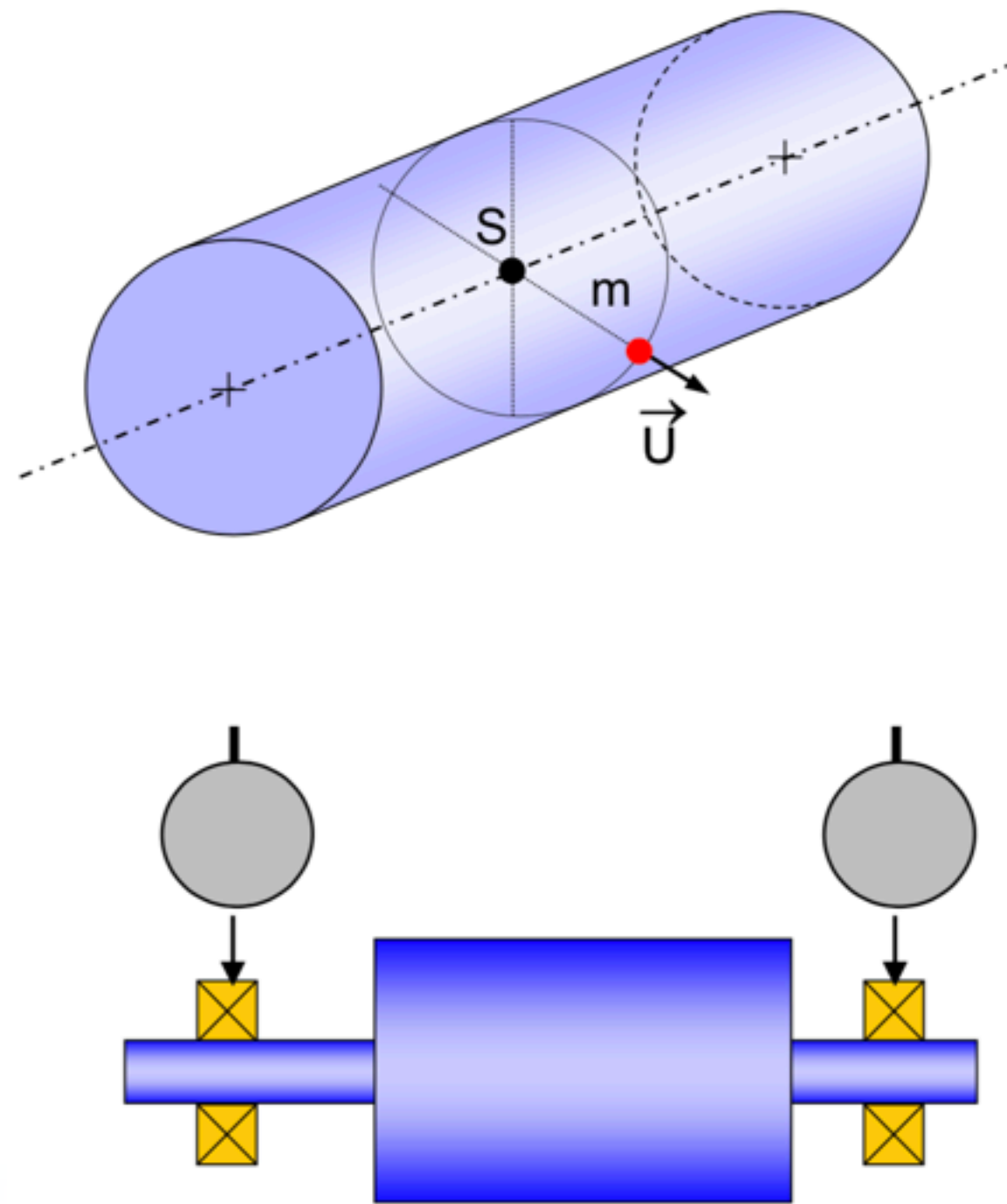
Dall'analisi della fase tra il segnale dei due supporti si identifica il tipo di squilibrio!



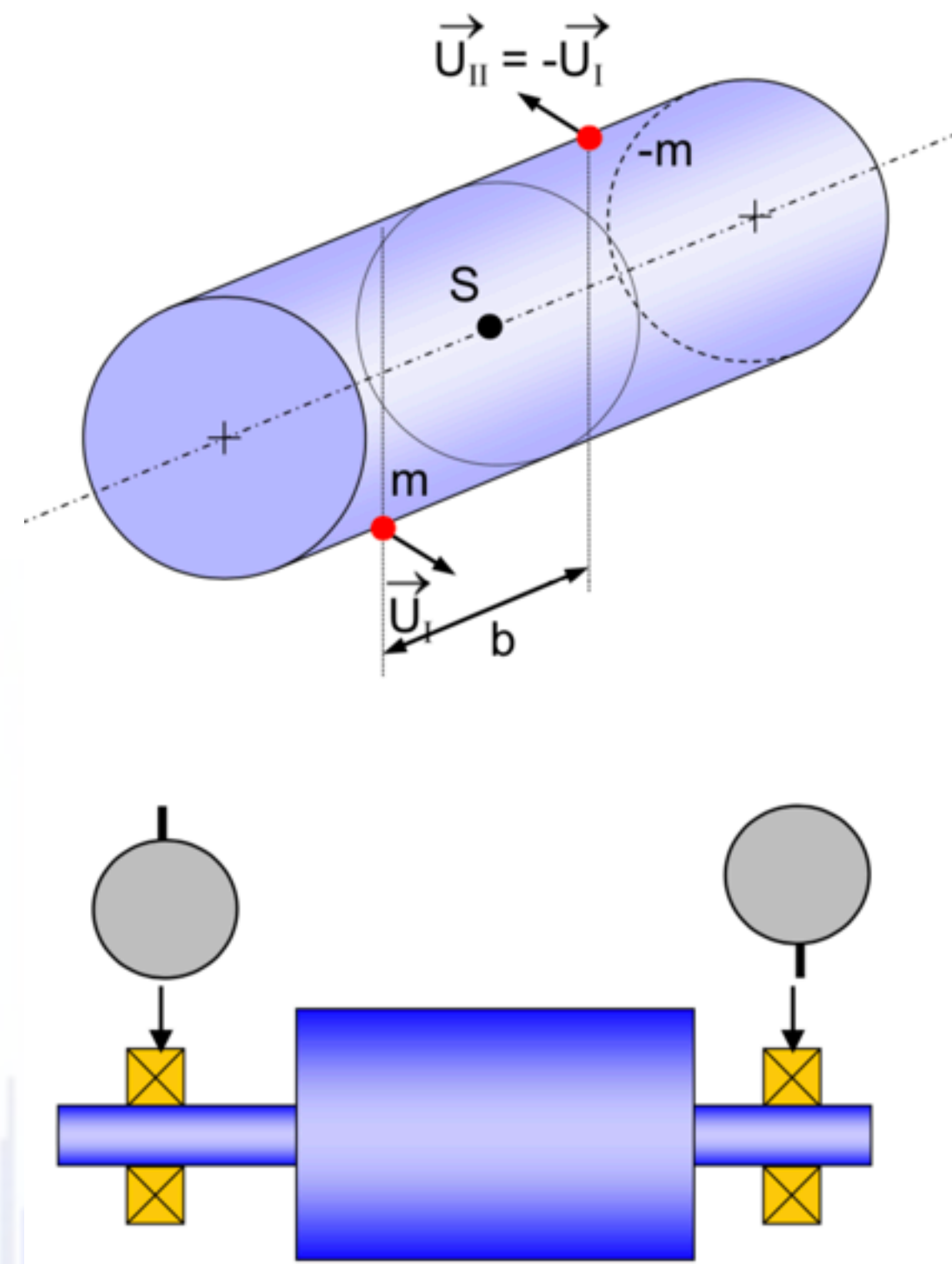
$$F = (mr)\omega^2$$



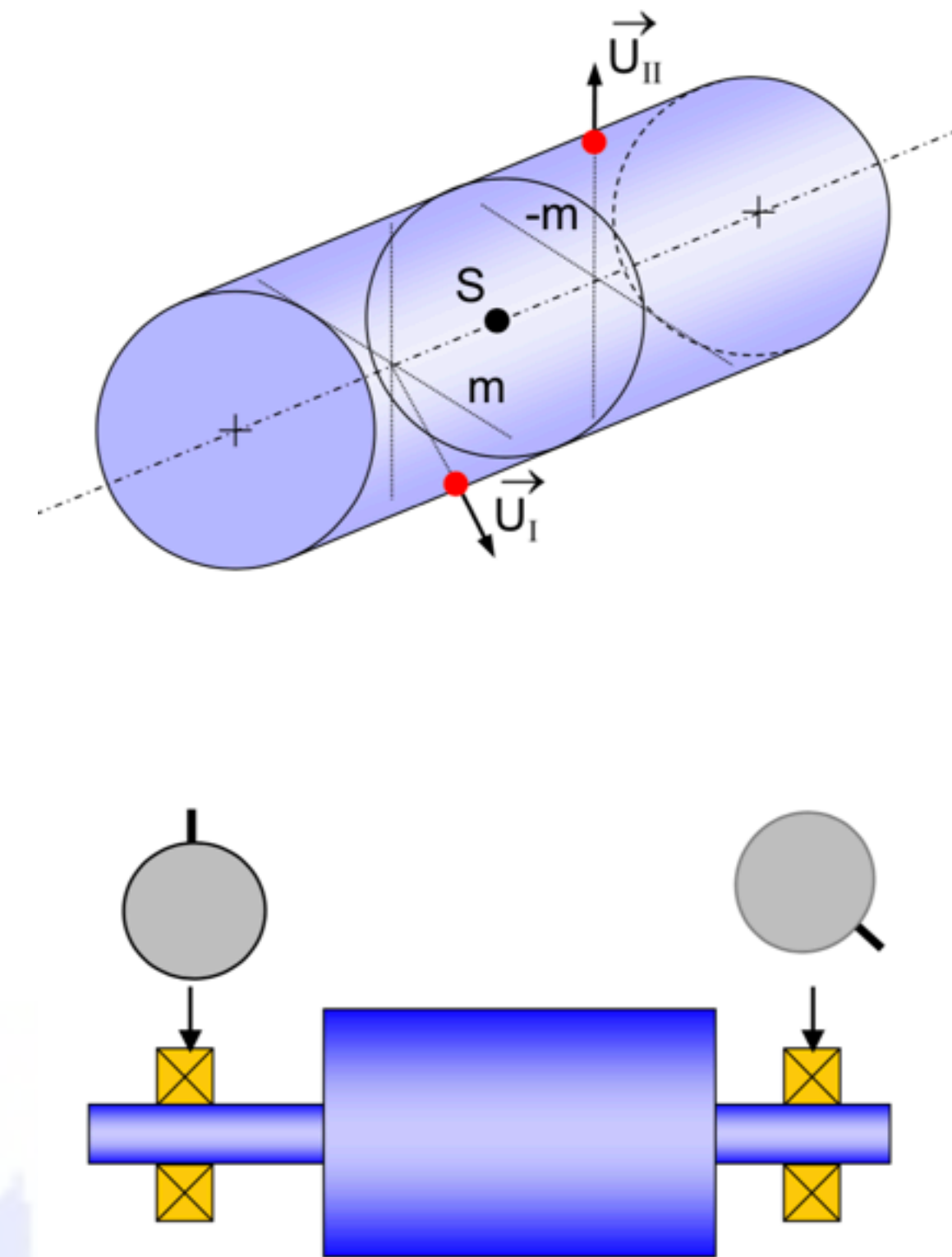
### Squilibrio Statico



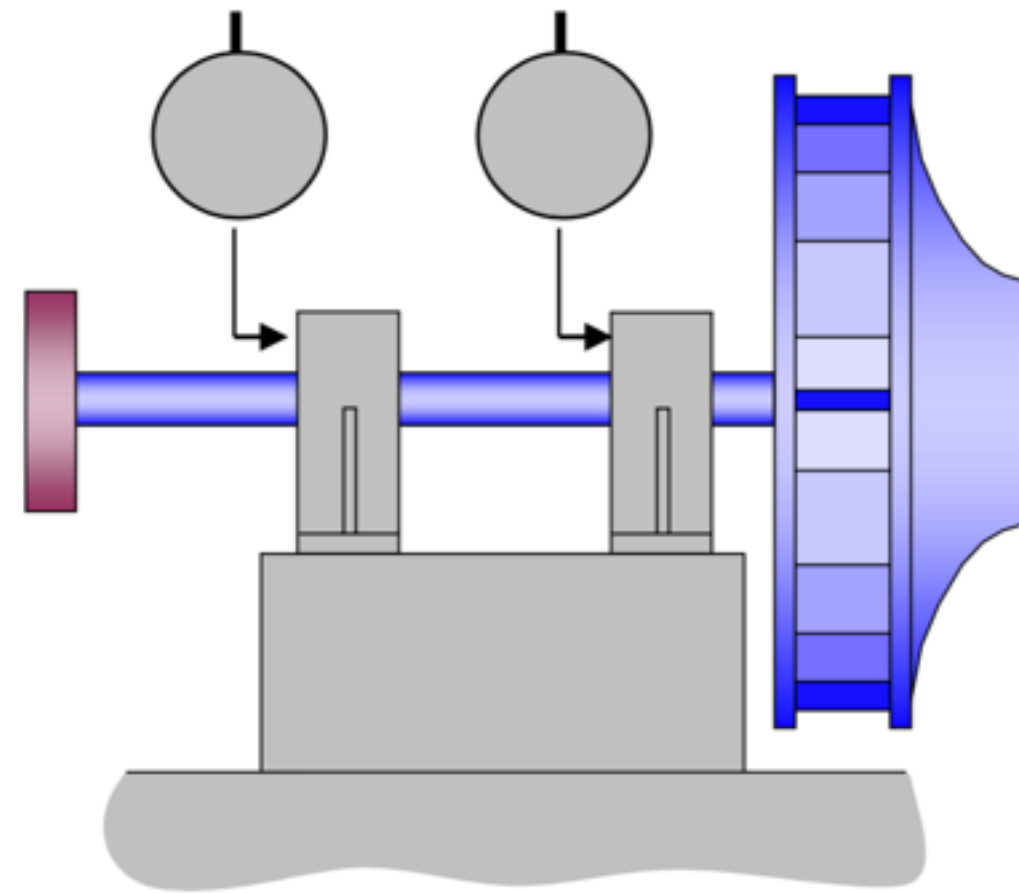
### Squilibrio di Coppia



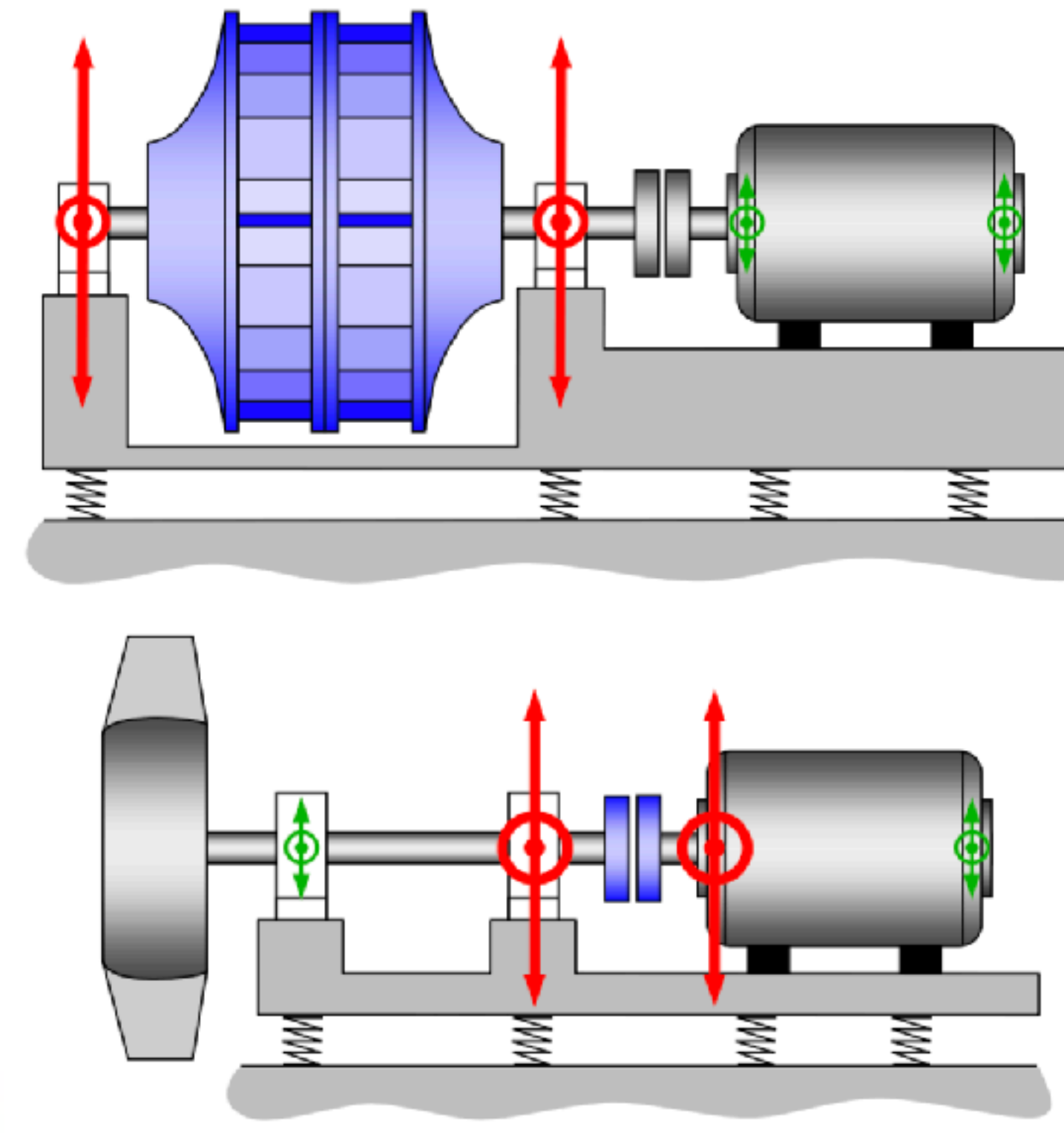
### Squilibrio Dinamico



Il bilanciamento riduce l'ampiezza del picco nello spettro ma non ne modifica la posizione in frequenza



Se i rotori sono "a sbalzo" ci sarà una componente radiale dovuta alla flessione dell'albero

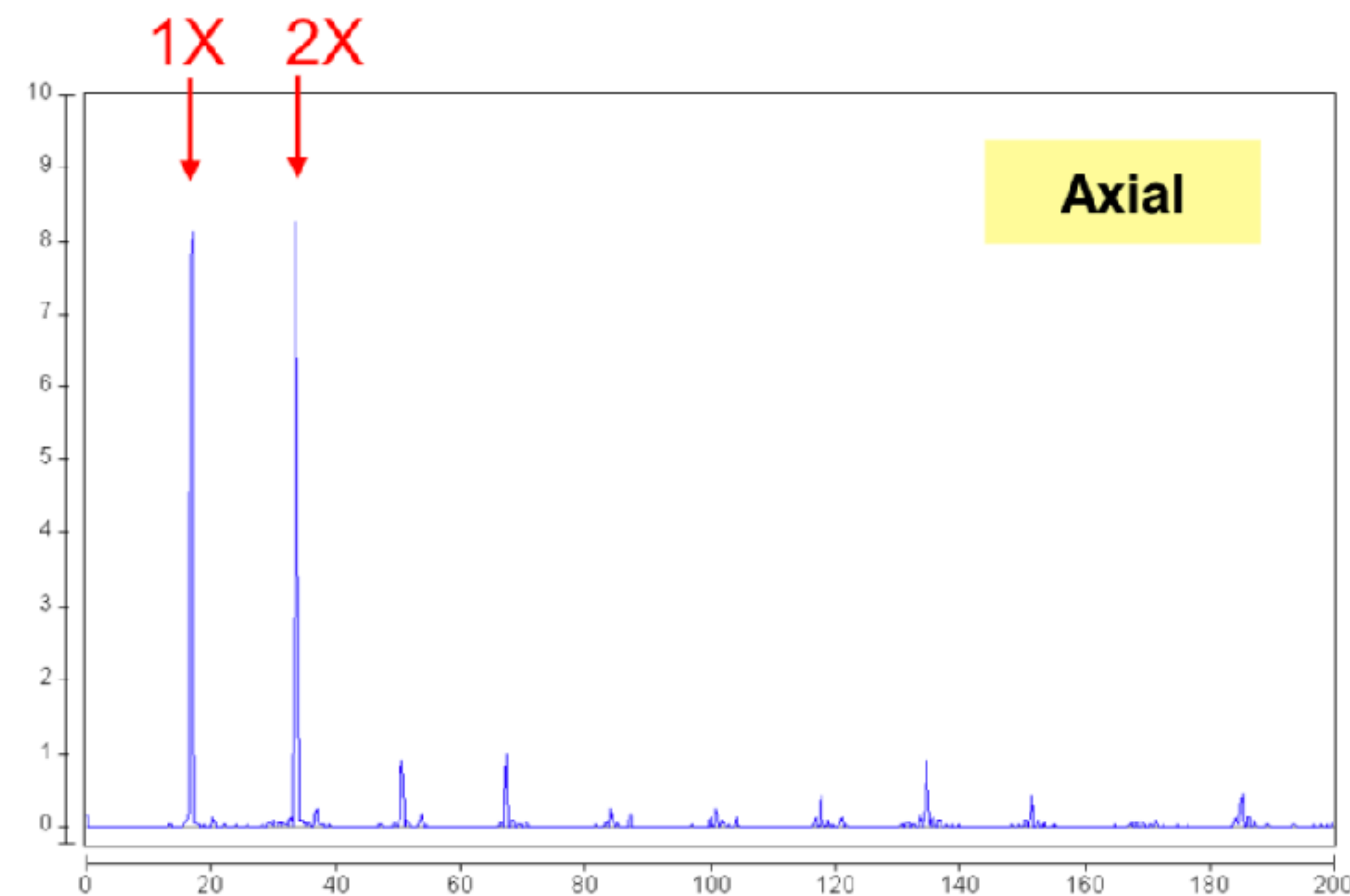
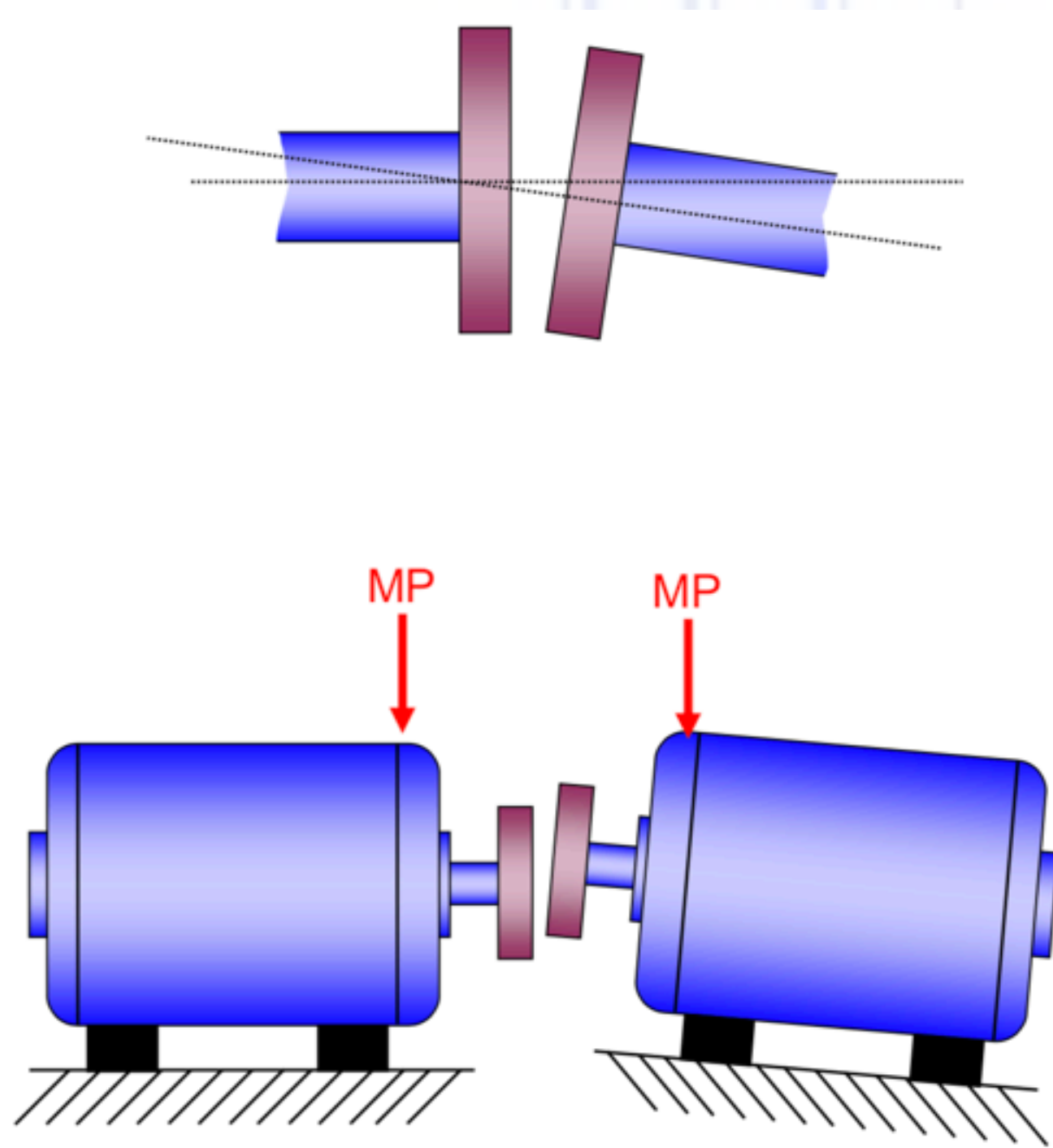


L'ampiezza relativa dei valori degli spettri dipende dalla posizione dell'elemento squilibrante

**Disallineamento..** accade ogniqualvolta l'asse di rotazione di due macchine collegate non è coincidente!

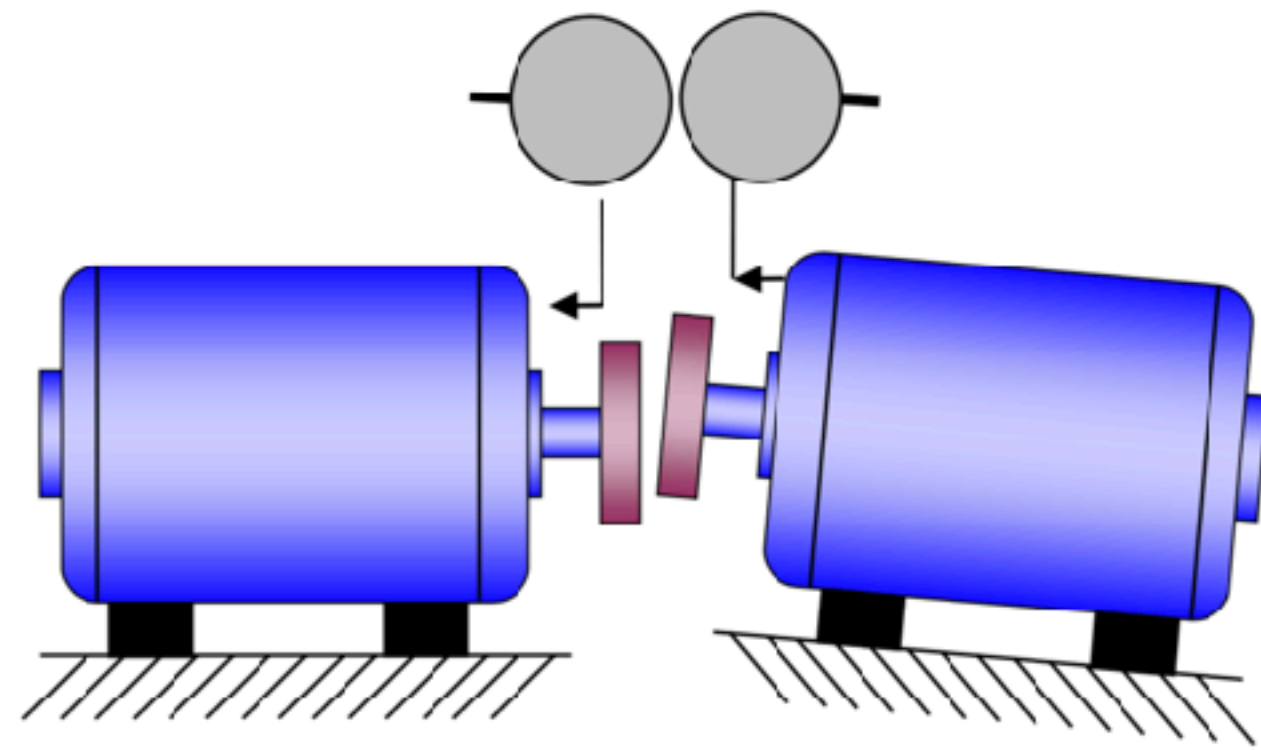
Solitamente compaiono in maniera predominante le componenti 1x e 2x in direzione assiale.

Dall'analisi dei segnali acquisiti ai due lati del giunto si identifica il tipo di disallineamento presente

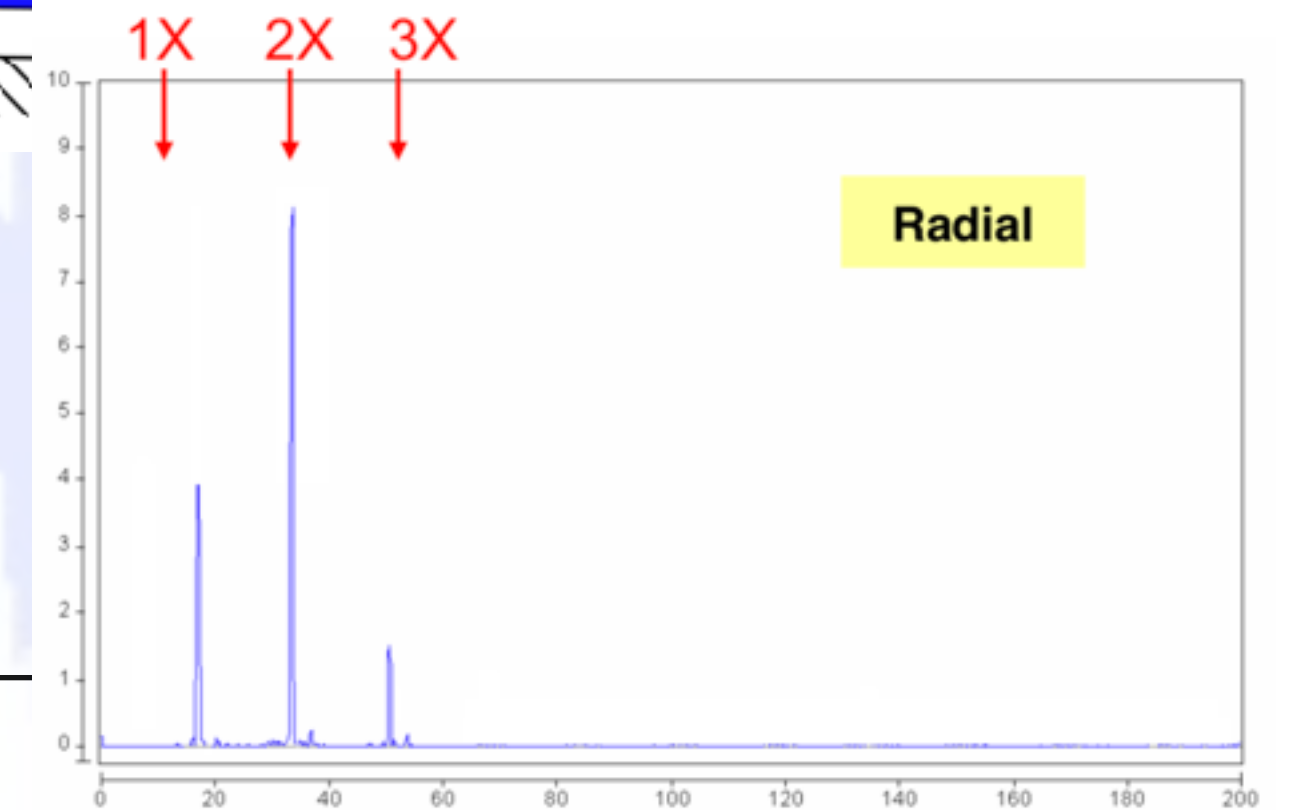
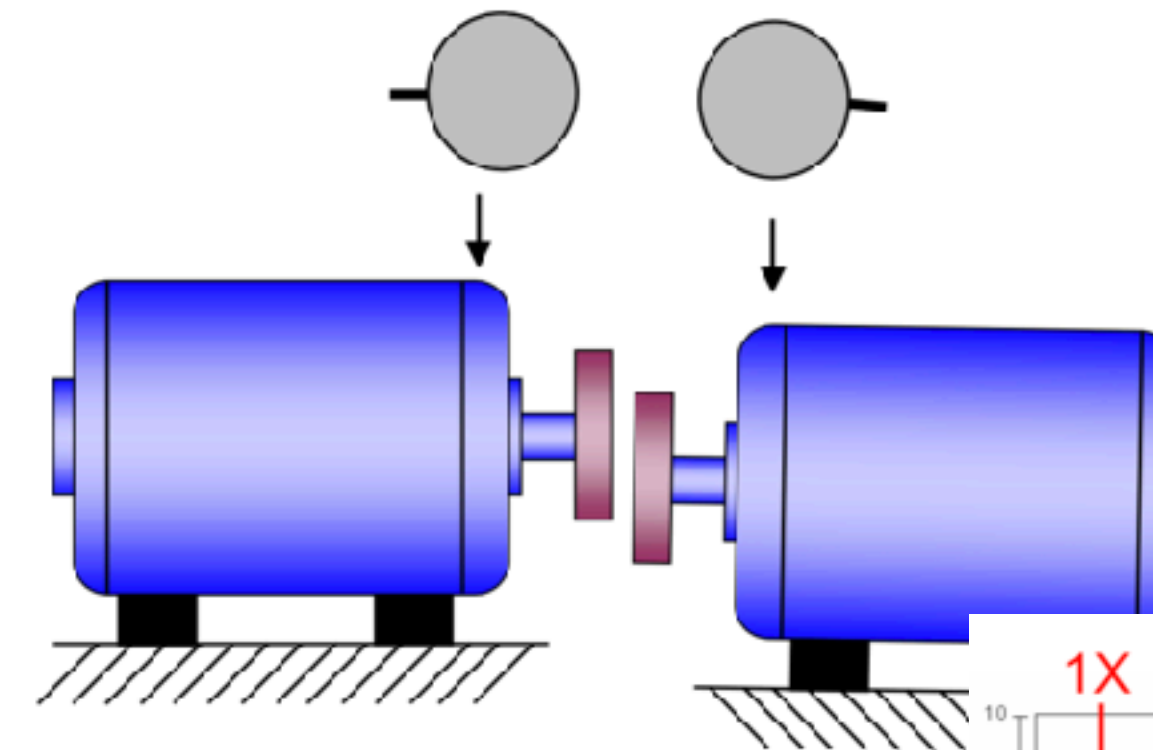
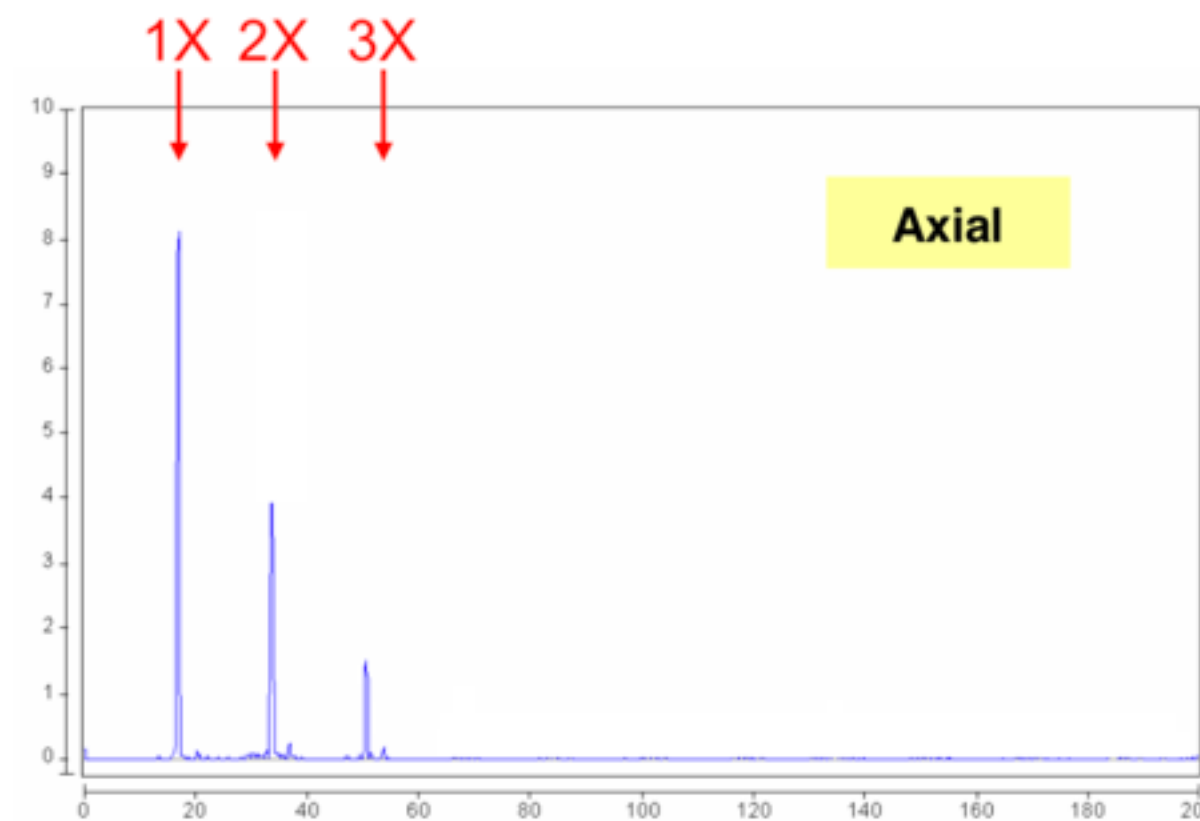
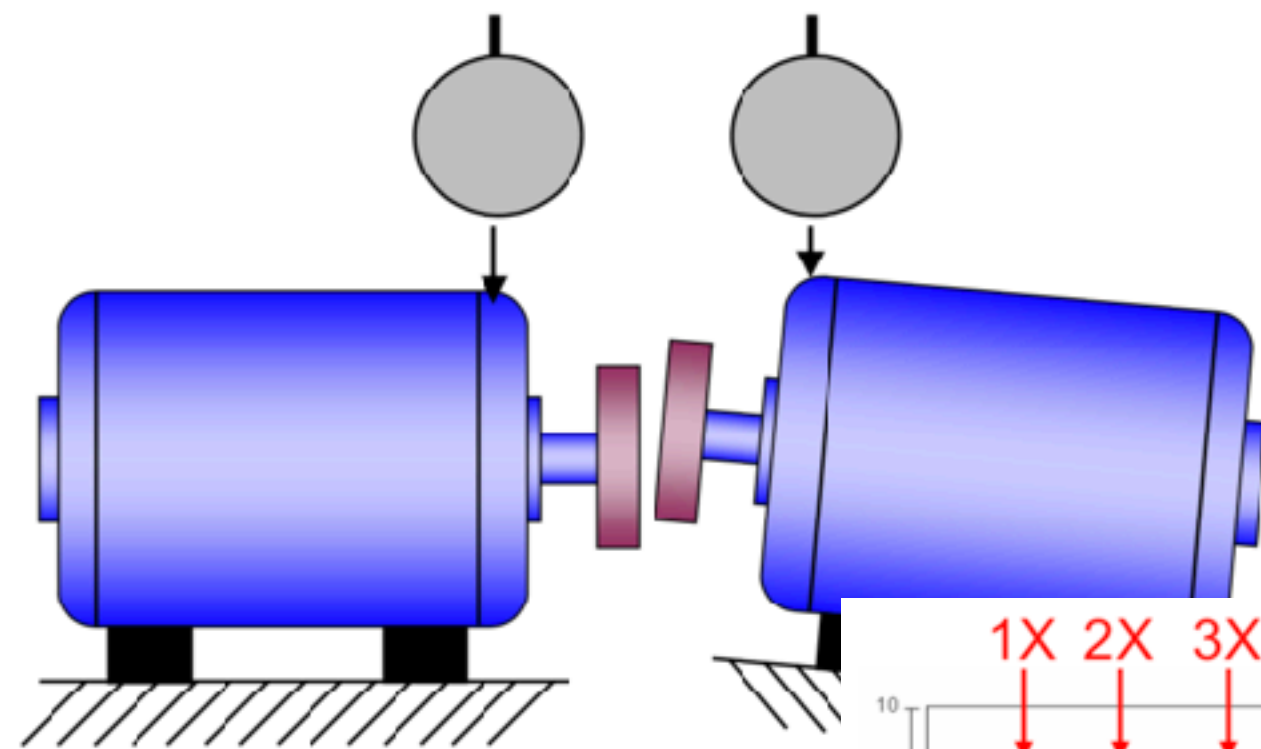
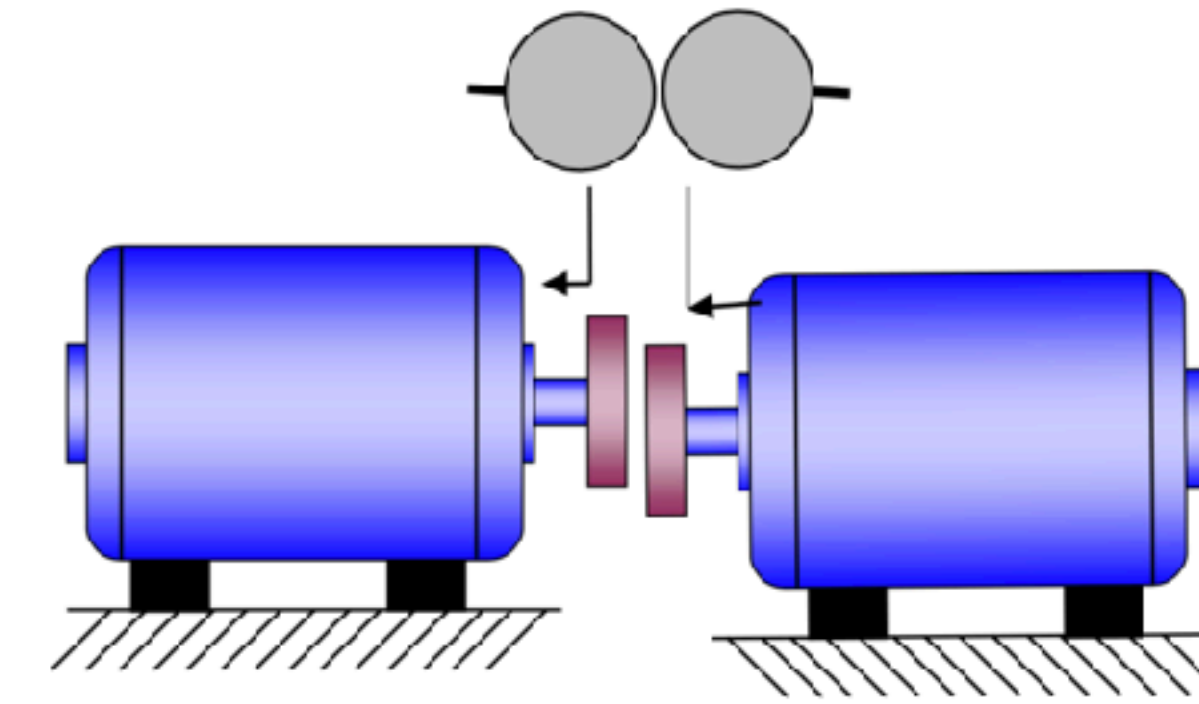




### Disallineamento Angolare



### Disallineamento Parallelo



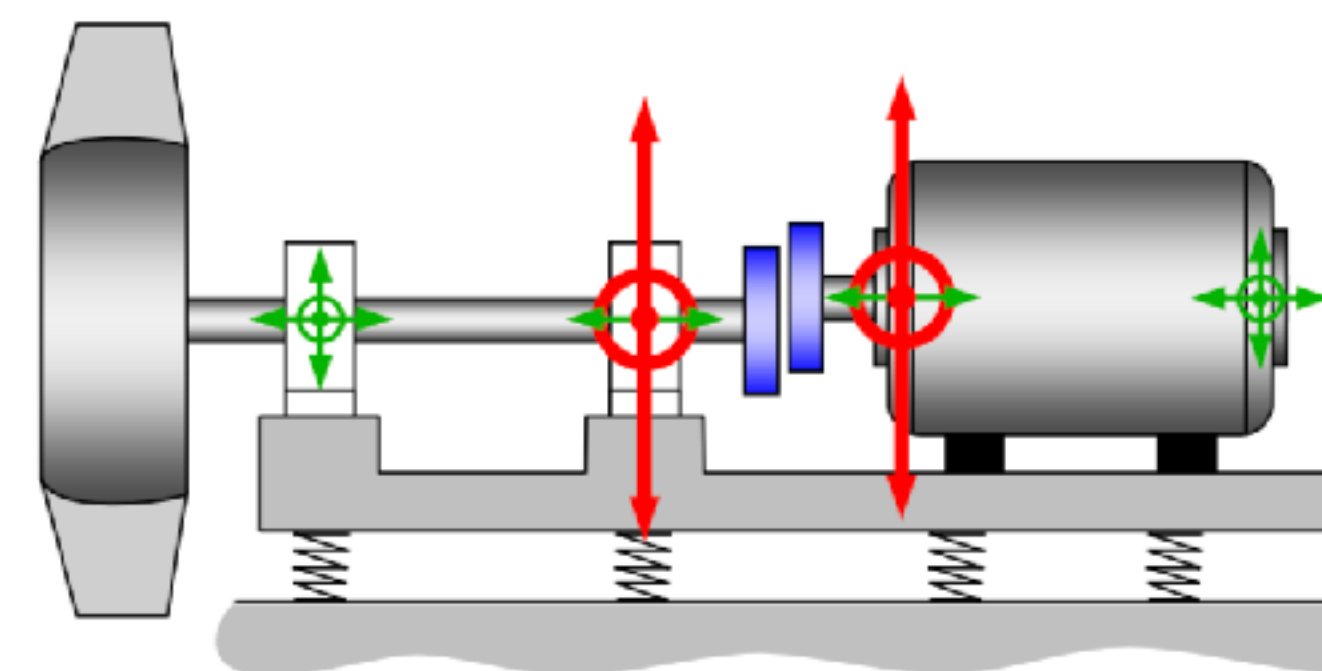
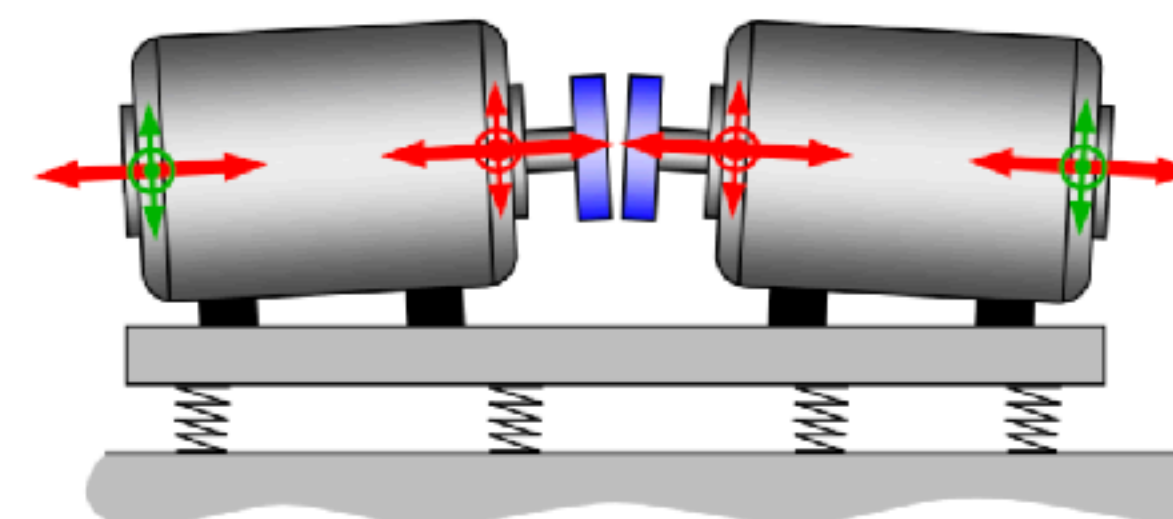
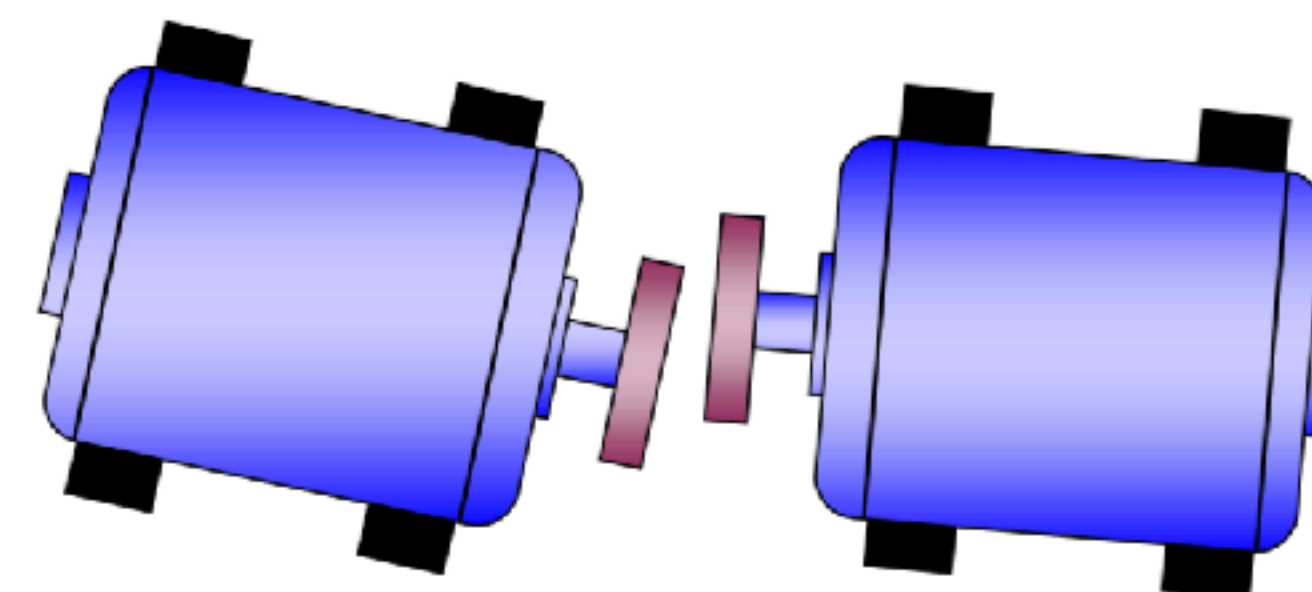
E' vietato ogni utilizzo diverso da quello inerente la preparazione dell'esame del corso di Meccanica delle Vibrazioni @Units  
E' espressamente vietato l'utilizzo per qualsiasi scopo commerciale e/o di lucro



**Disallineamento..** di solito è una combinazione dei precedenti!

Si distingue dallo squilibrio facendo test a differenti velocità o provando le macchine disaccoppiate!

La dilatazione termica può aumentare o diminuire il disallineamento.. attenzione come si fanno le misure

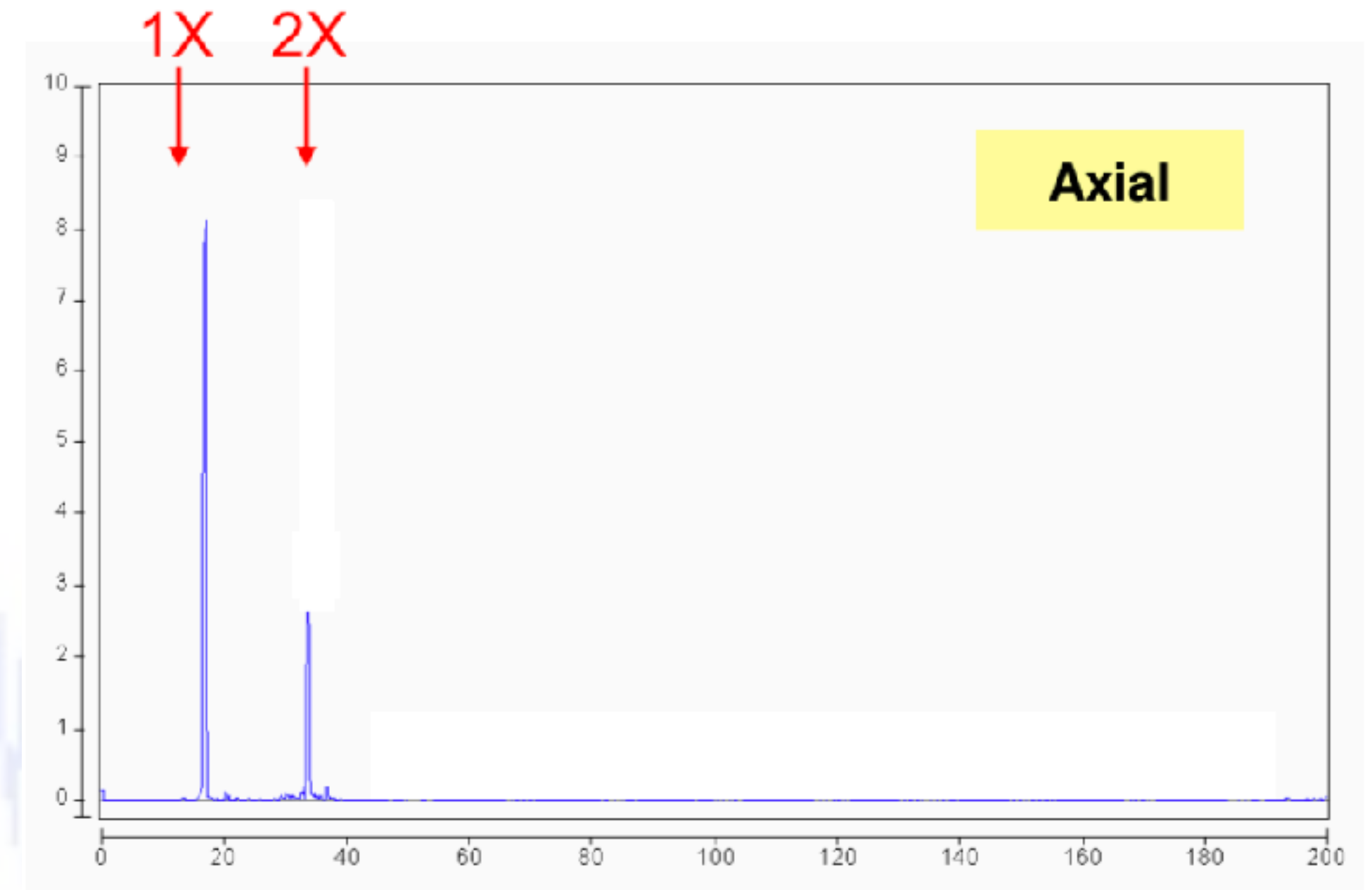
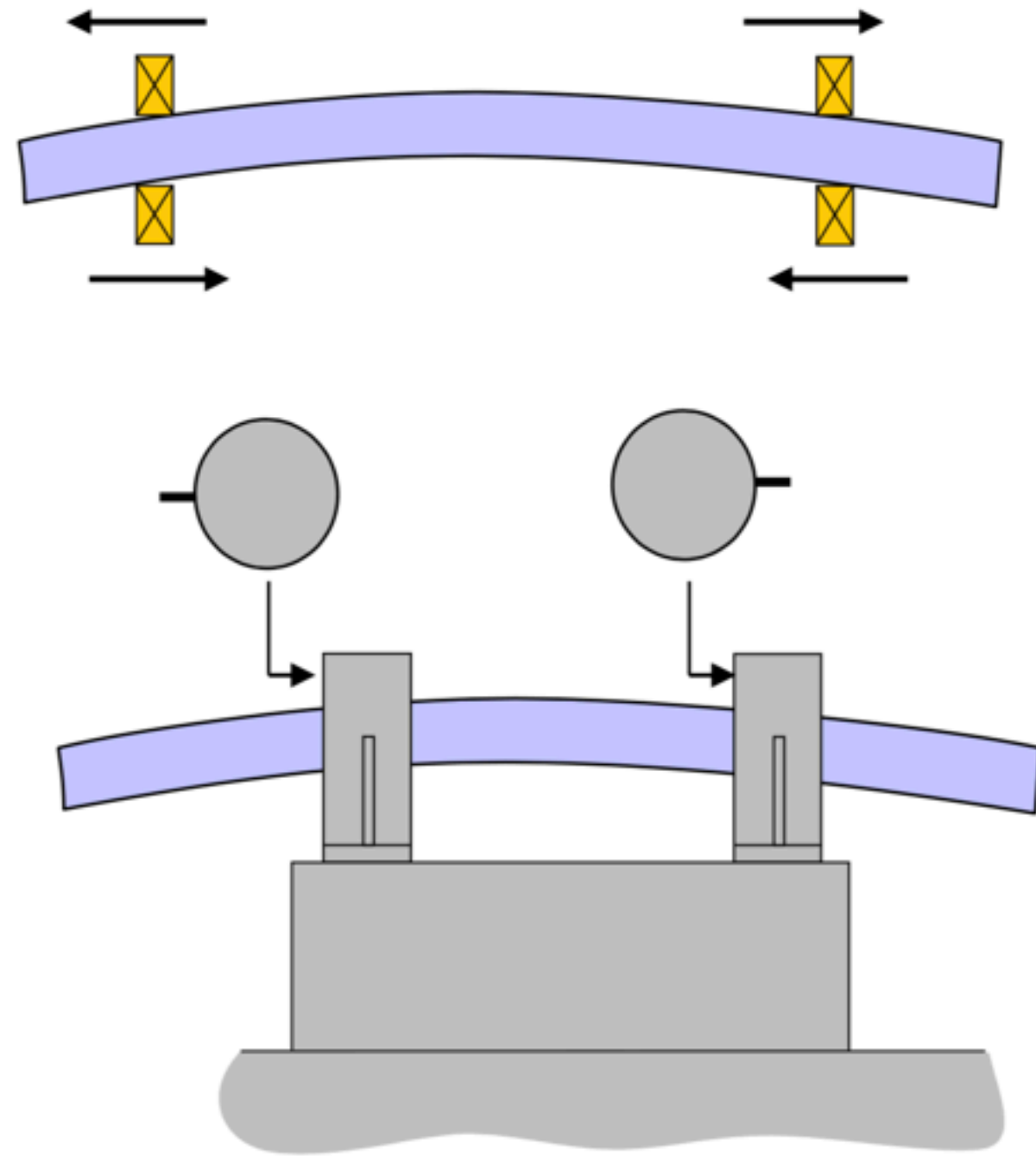


		Alignment Tolerance inch [mils] 😊	
		RPM	acceptable    excellent
<b>Short "flexible" couplings</b>			
<b>Offset</b> 		900	6.0    3.0
		1200	4.0    2.5
		1800	3.0    2.0
		3600	1.5    1.0
<b>Angularity</b> (gap difference at coupling edge per 10" diameter) 		900	10.0    7.0
		1200	8.0    5.0
		1800	5.0    3.0
		3600	3.0    2.0
<b>Spacer shafts and membrane (disk) couplings</b>			
<b>Offset</b> (per inch spacer length) 		900	2.0    1.2
		1200	1.5    0.9
		1800	1.0    0.6
		3600	0.5    0.3
<b>Angularity</b> [mrad] 		900	2.0 [mrad]    1.2
		1200	1.5    0.9
		1800	1.0    0.6
		3600	0.5    0.3
<b>Soft foot</b>		any	2.0 mils

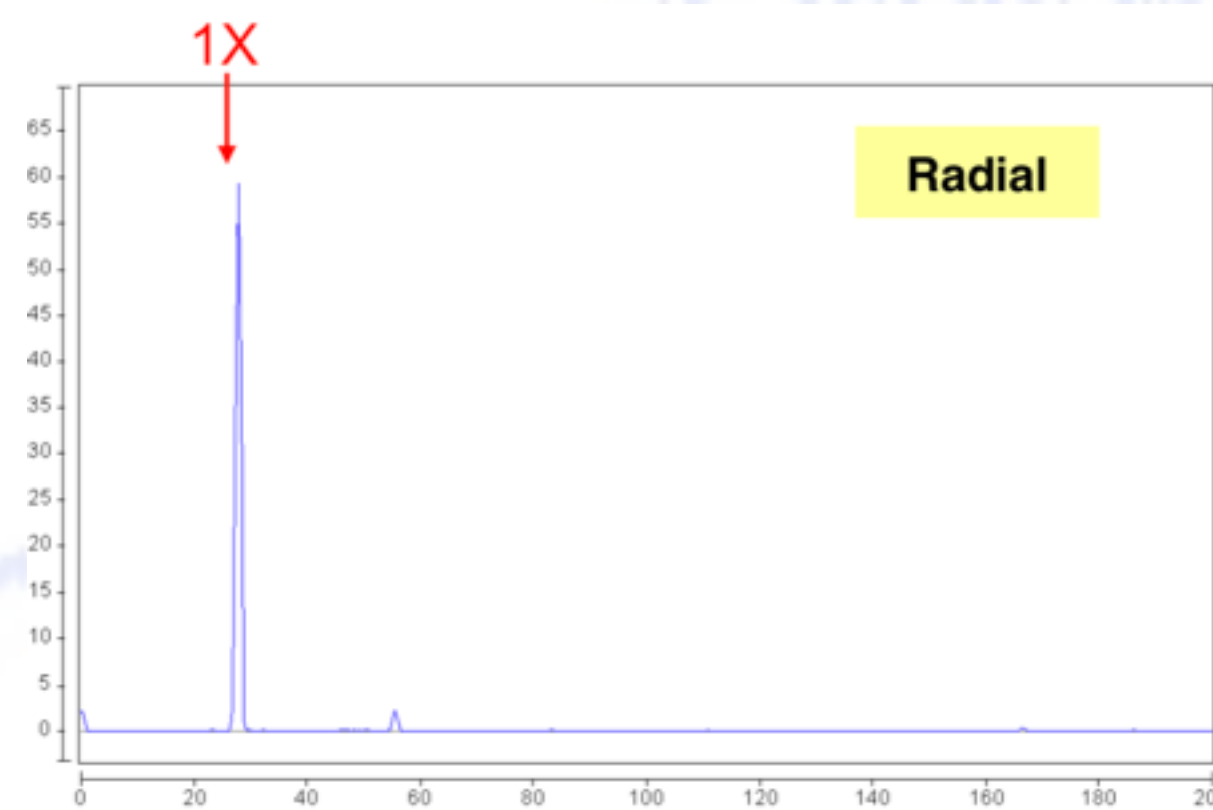
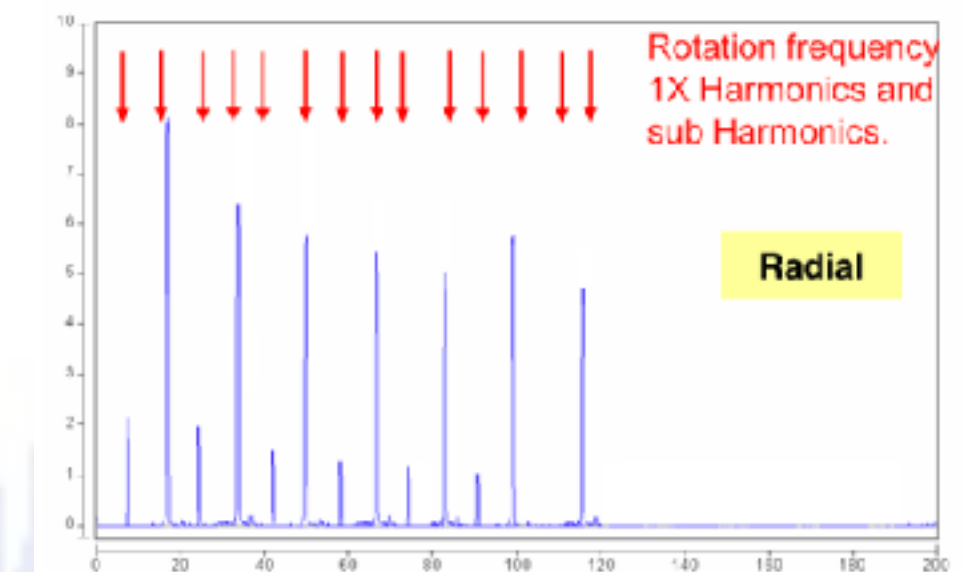
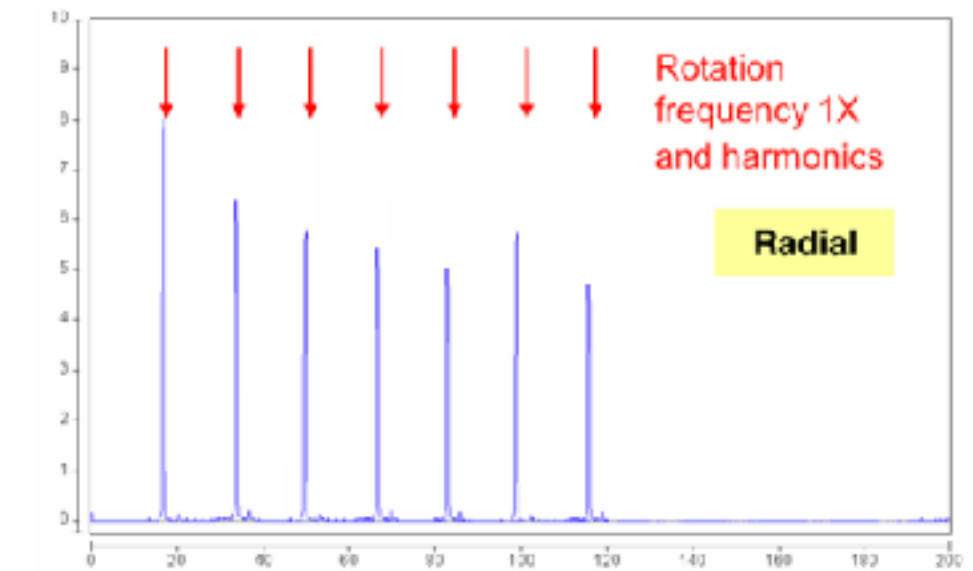
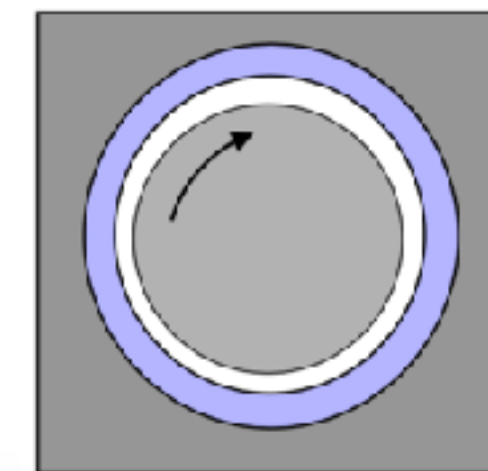
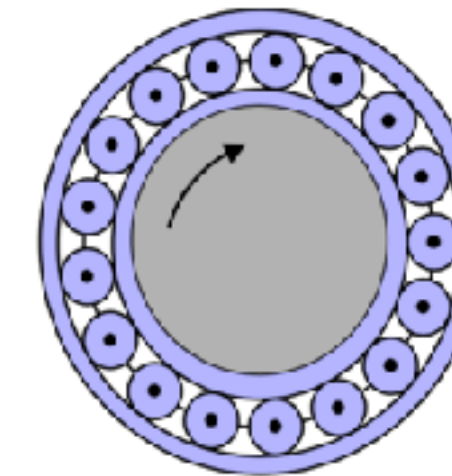
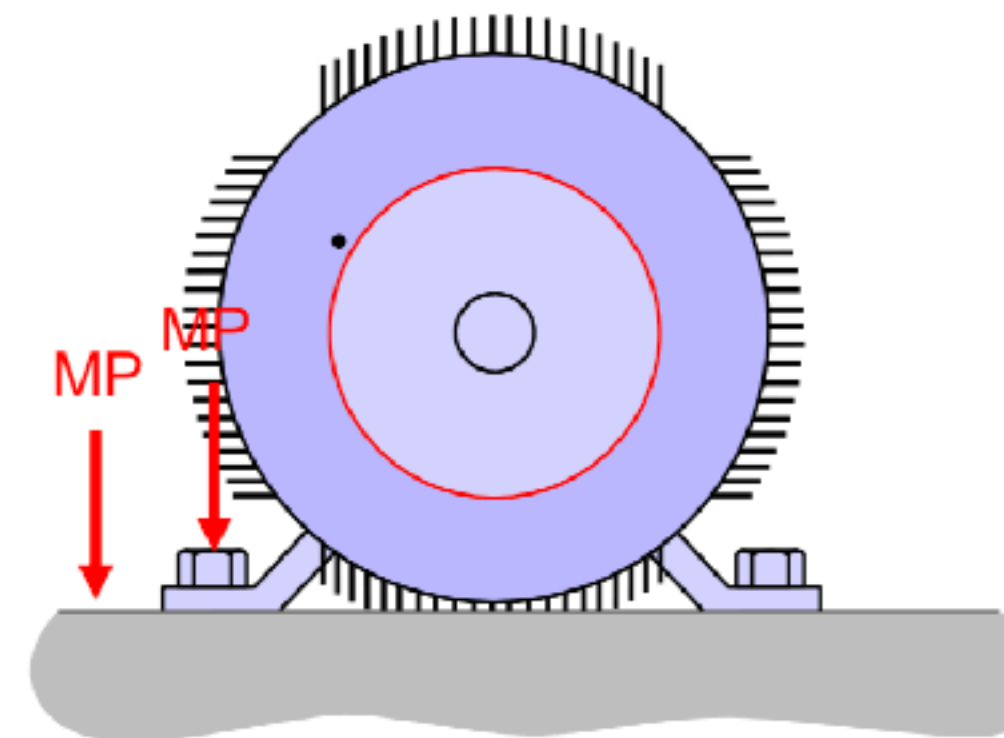
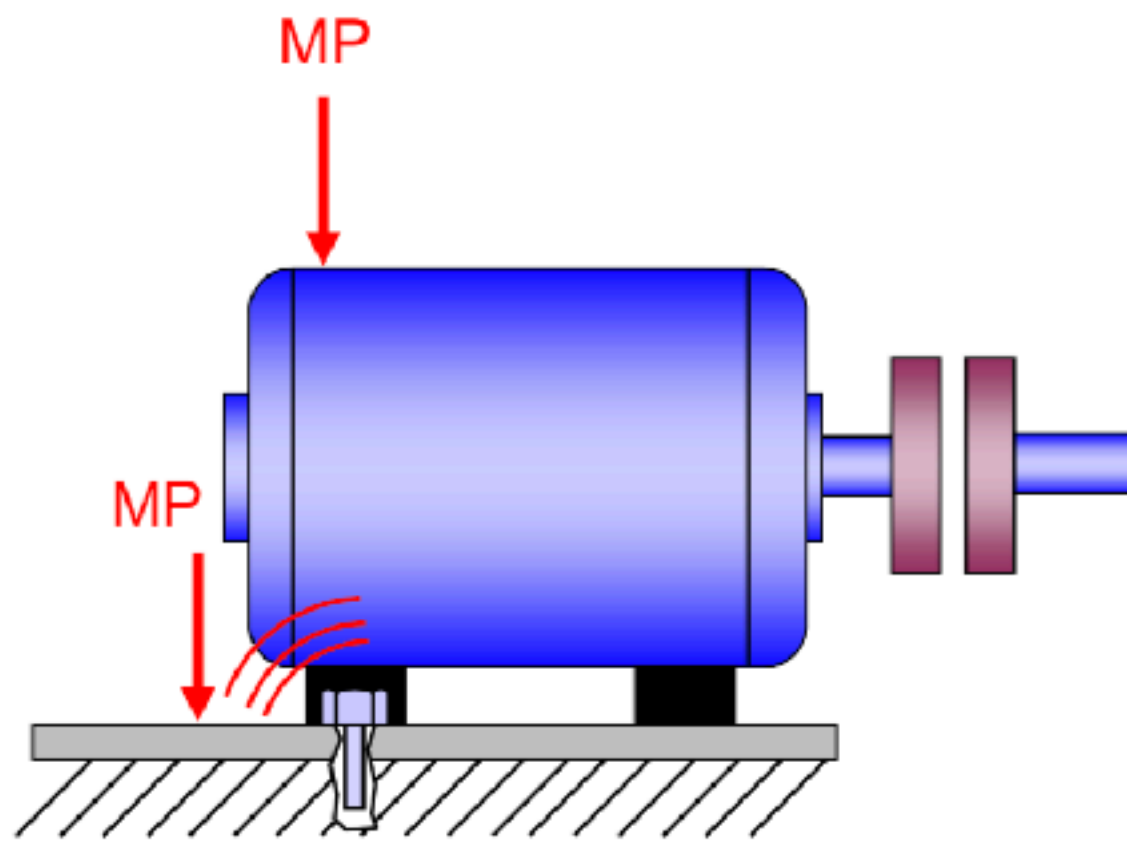
mils  
= 1/1000 di pollice  
= 0,0245 mm

**Flessione dell' albero..** accade ogniqualvolta l'asse di rotazione non è rettilineo  
Può essere congenito con l'albero, o imposto da carichi esterni.

I supporti sono eccitati assialmente ed in controfase



**Allentamenti..** possono essere di diversi tipi, degli organi interni alla macchina (cuscinetto) o nelle connessione tra la macchina ed il resto del mondo

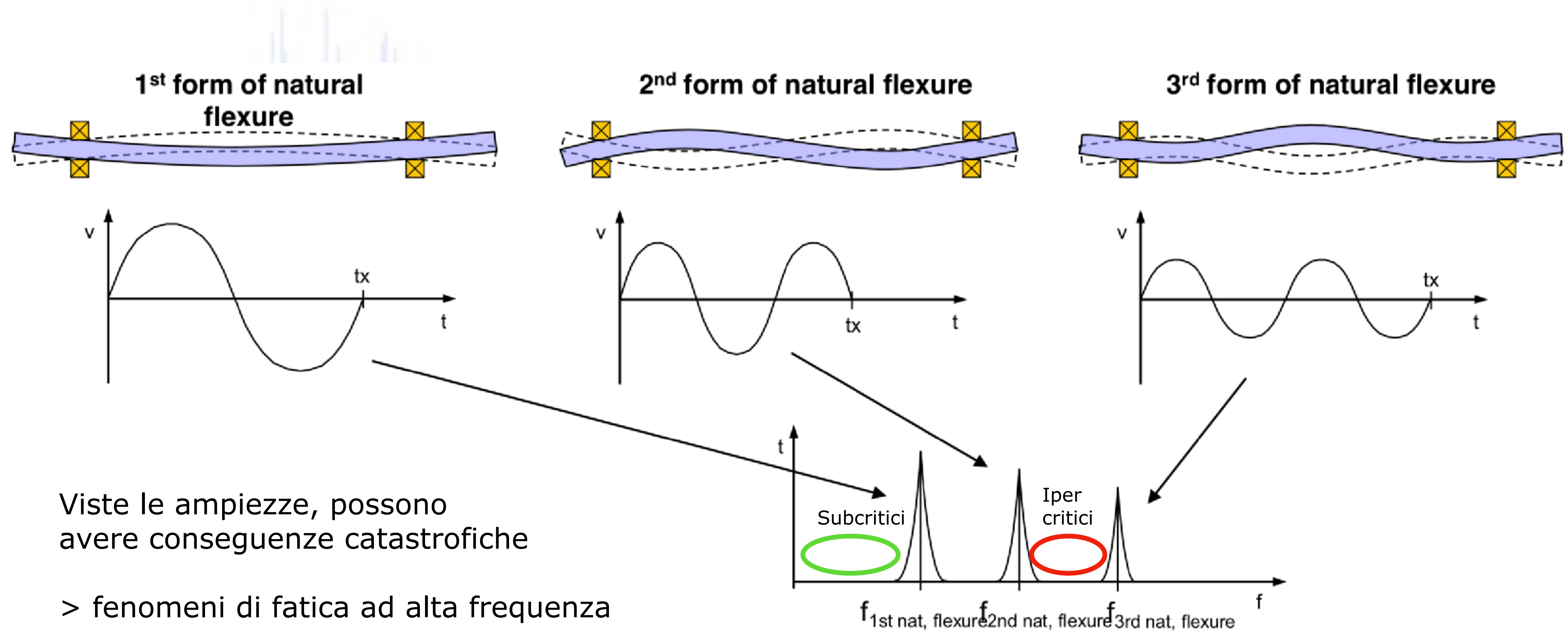


Soft foot:  
allentamenti, cedimenti della base  
misurare la macchina e la fondazione

Saranno in fase o in opposizione?

Membri interni:  
armoniche e sub-armoniche

**Risonanze..** ogniqualvolta una forzante eccita una risonanza del sistema, genererà elevati livelli di vibrazioni (le risonanze non hanno relazione armonica!)



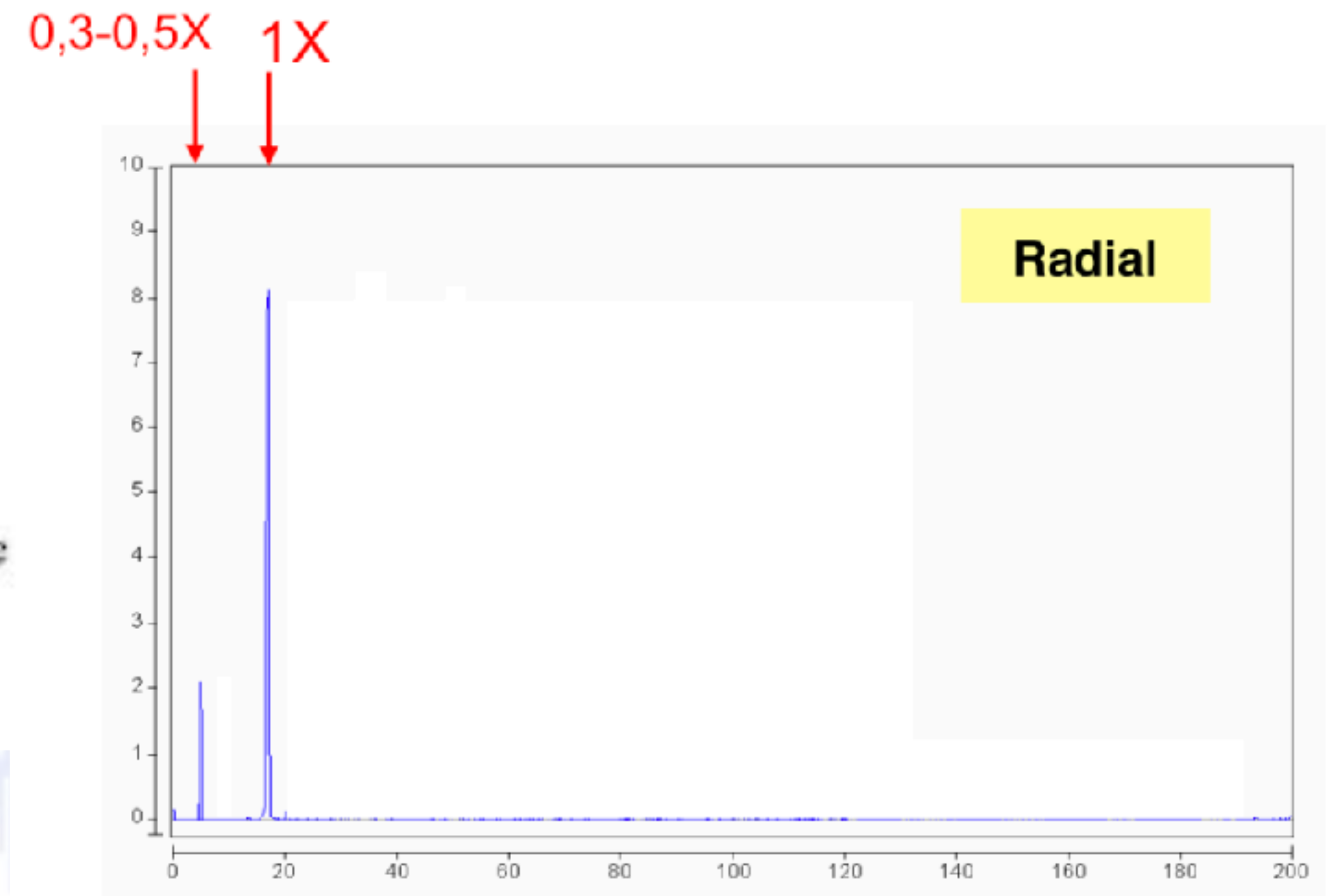
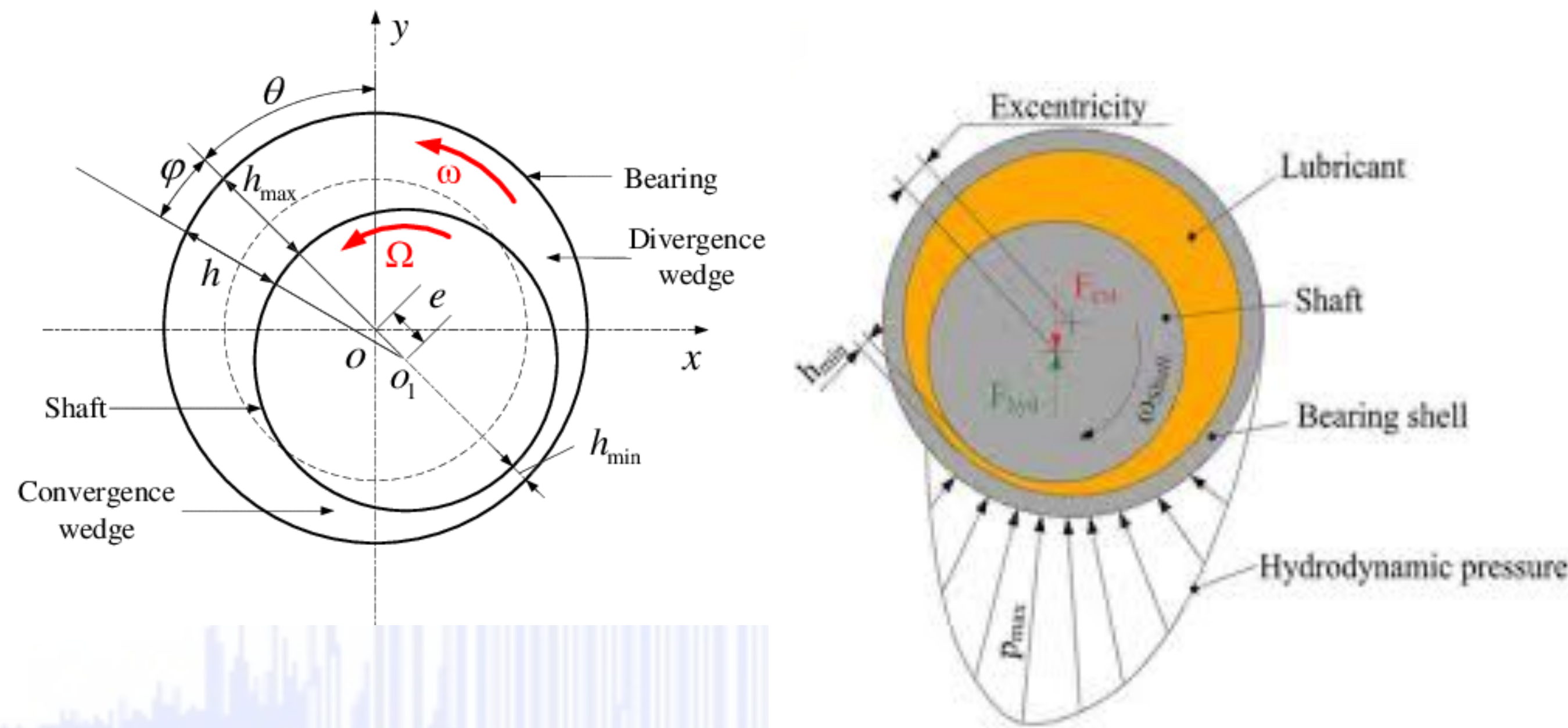
Viste le ampiezze, possono avere conseguenze catastrofiche

> fenomeni di fatica ad alta frequenza

**Cuscinetti Idrodinamici..** nei cuscinetti è il lubrificante nel meato (convergente divergente) che supporta il carico.

Si instaurano movimenti a bassa frequenza correlati al movimento dell'albero nella sede ed alla continua instabilità del meato.

Le sub-armoniche sono tipiche !!

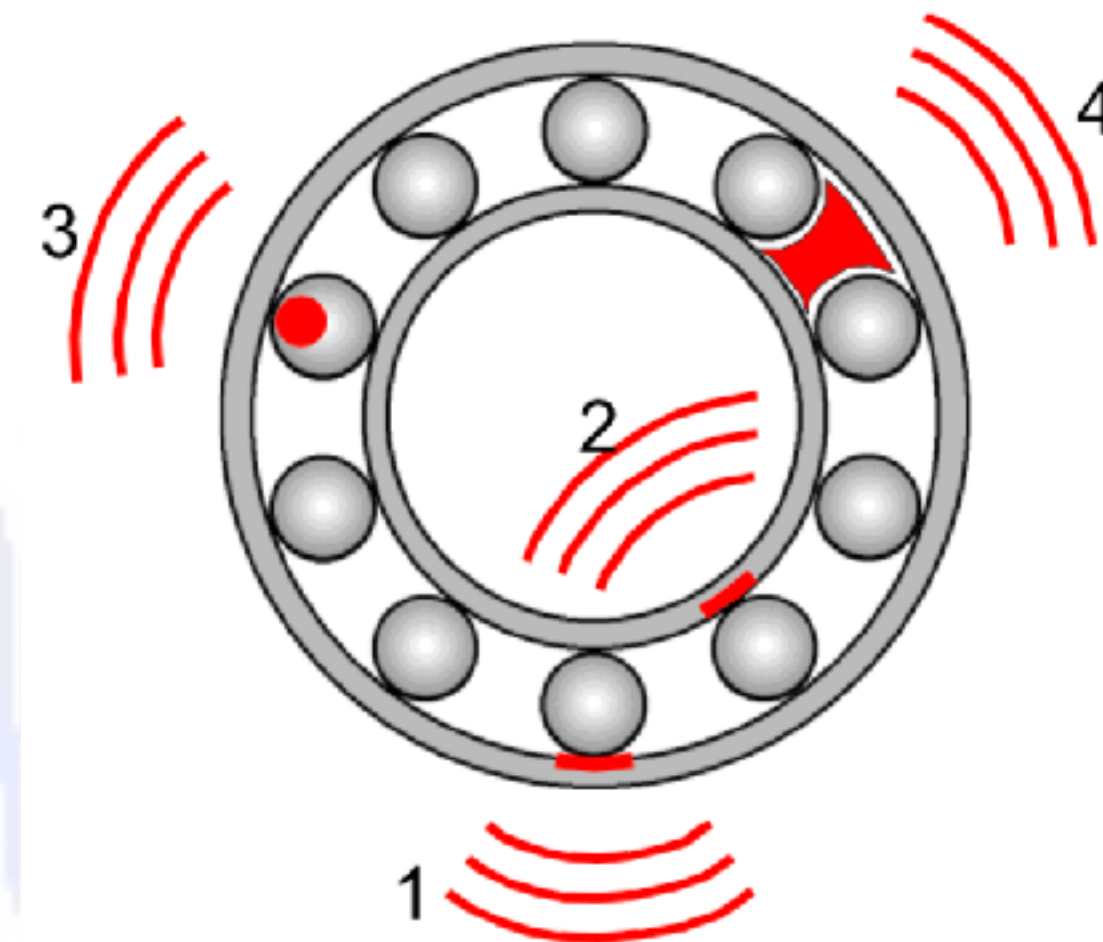
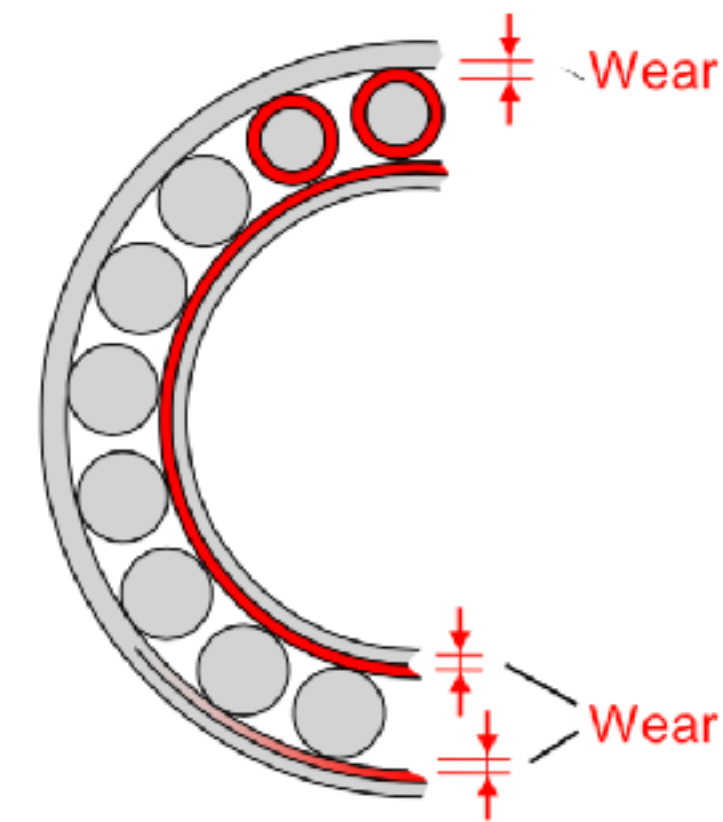


**Cuscinetti volventi..** nei cuscinetti a strisciamento si instaurano diversi fenomeni che possono cambiare l'impronta vibrazione registrata

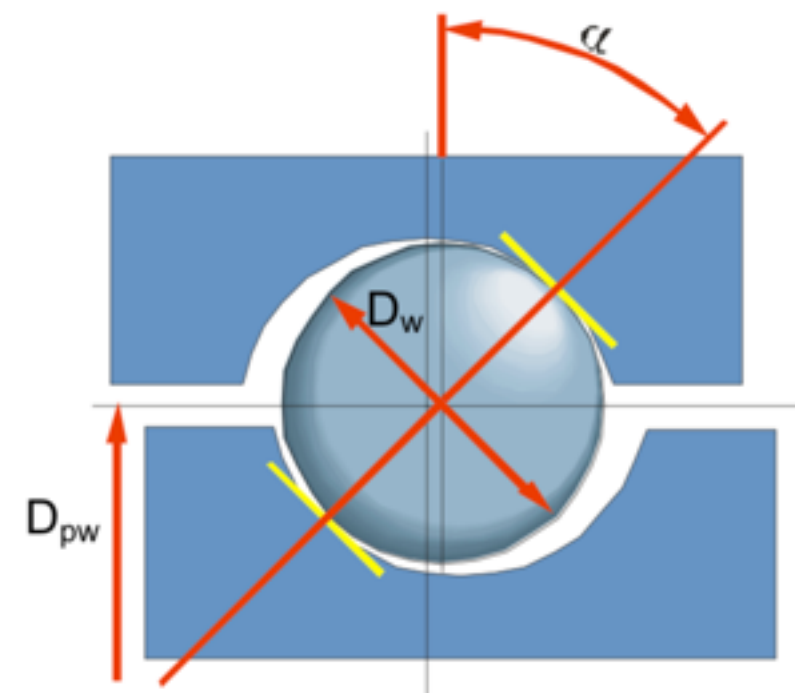
In generale c'è usura con conseguente aumento dei giochi, che fa aumentare le vibrazioni. Questa è dovuto a sovraccarichi, a sbagliati dimensionanti e montaggi a mancanza di lubrificazione

..

In seconda battuta ci sono di danneggiamenti delle parti (piste interne o esterne, elementi volventi, gabbie) ciascuno associato alla geometria del cuscinetto ed alla sua cinematica



**Cuscinetti volventi..** i calcoli sono non sono troppo complessi, ma richiedono la precisa conoscenza della geometria e delle dimensioni delle parti



Più facile è sfruttare i calcolatori di frequenza messi a disposizione dei produttori dei cuscinetti stessi

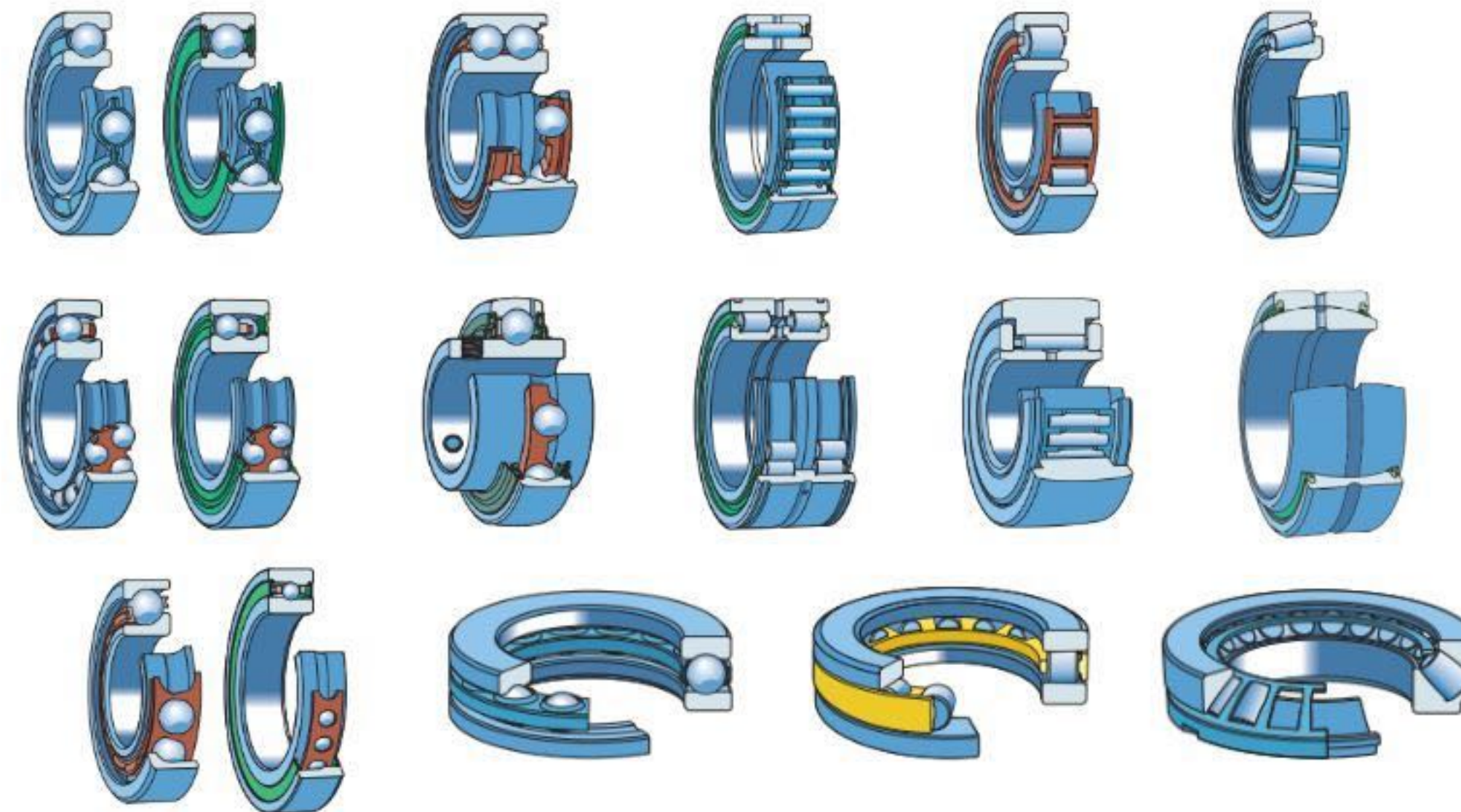
(soprattutto quanto i tipi di cuscinetti installati è numeroso e differente dai cuscinetti radiali a sfere con una sola pista)

$$BPFO = \frac{Z \cdot n}{2 \cdot 60} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$BPFI = \frac{Z \cdot n}{2 \cdot 60} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$BSF = \frac{D \cdot n}{d \cdot 60} \left( 1 - \left[ \frac{d}{D} \cos \alpha \right]^2 \right)$$

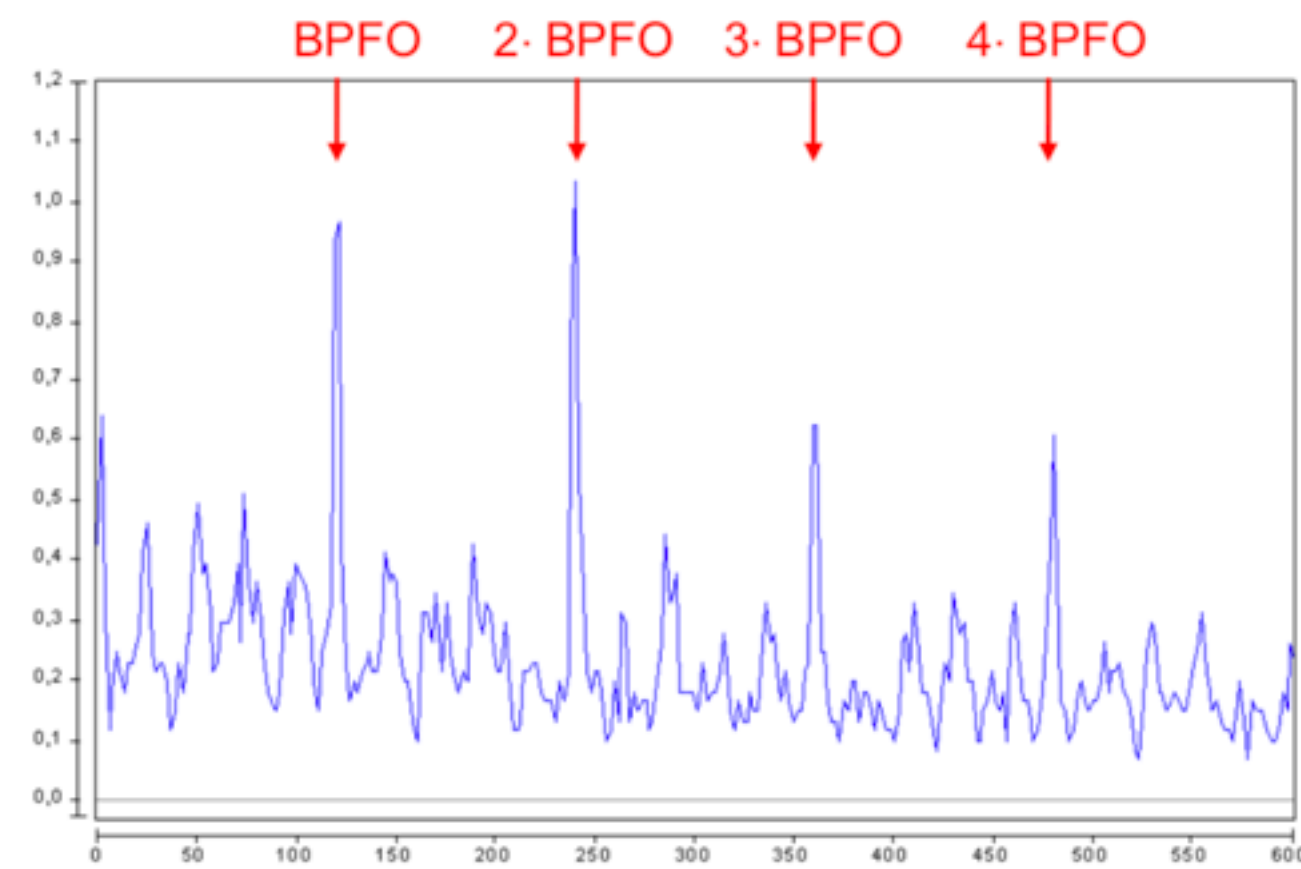
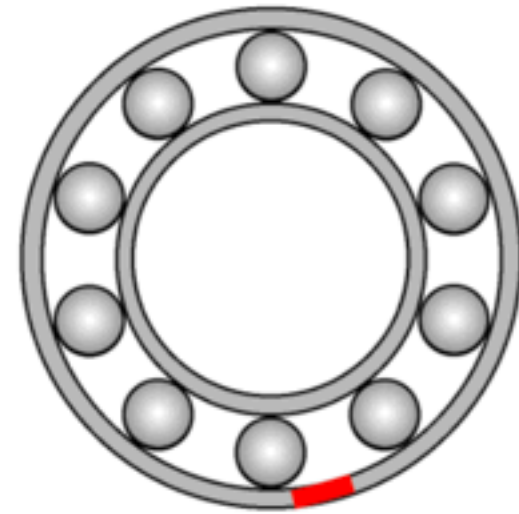
$$TFT = \frac{n}{2 \cdot 60} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$



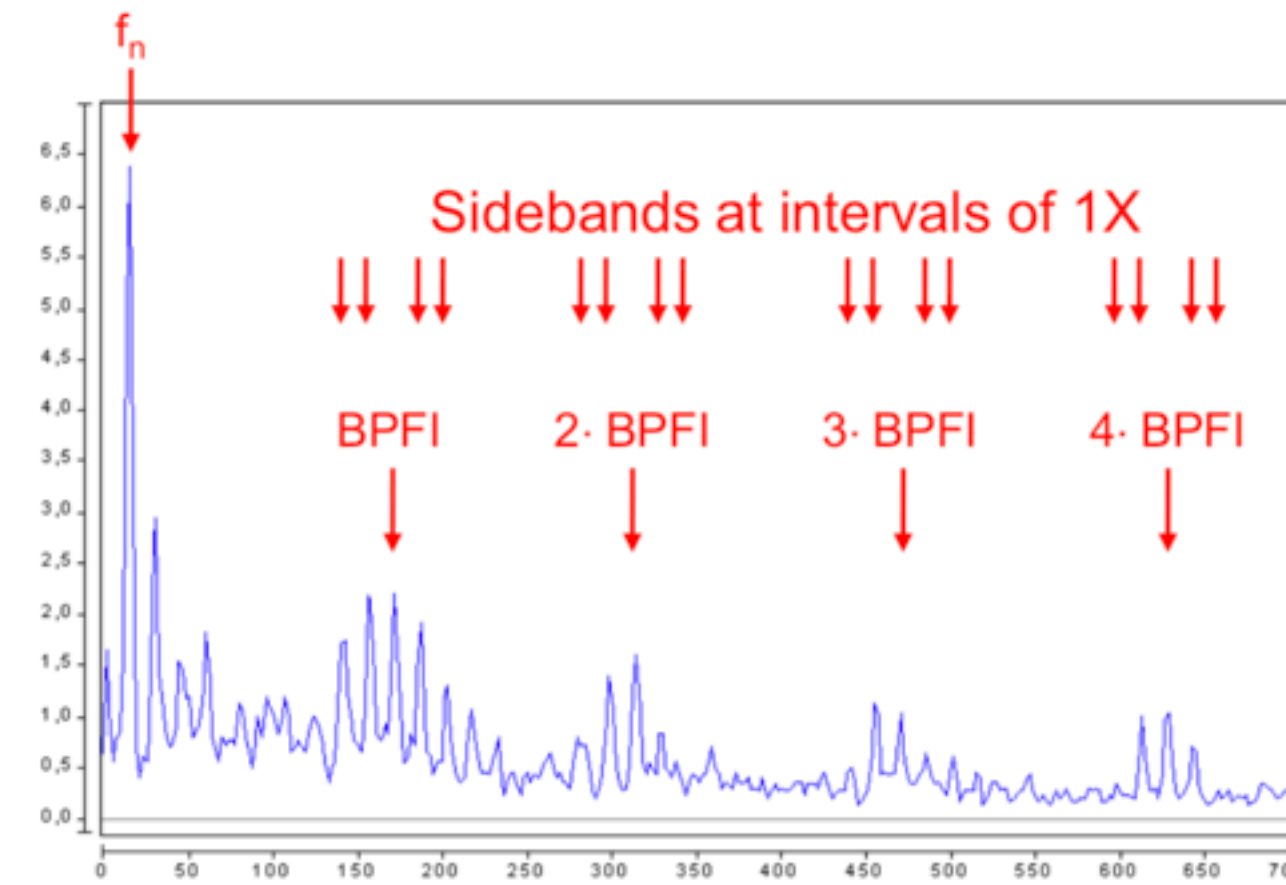
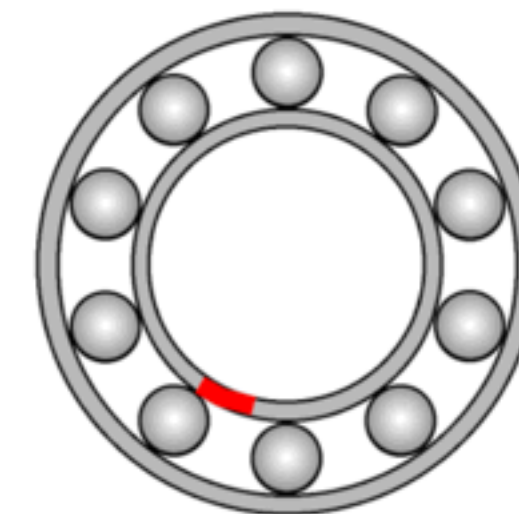


Cuscinetti volventi.. la localizzazione del danno è facilitata dalla forma dello spettro

Danno guida esterna  
BPFO

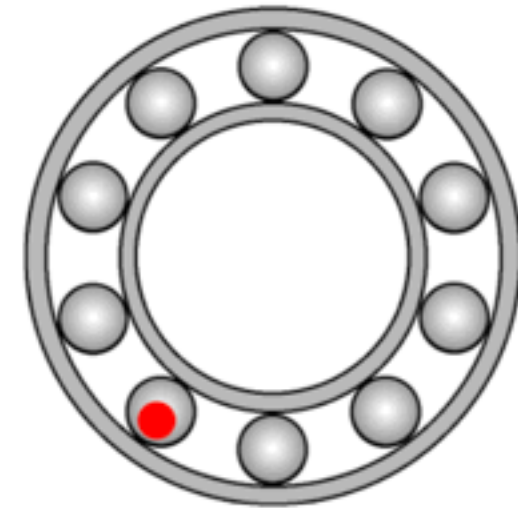


Danno guida interna  
BPFI

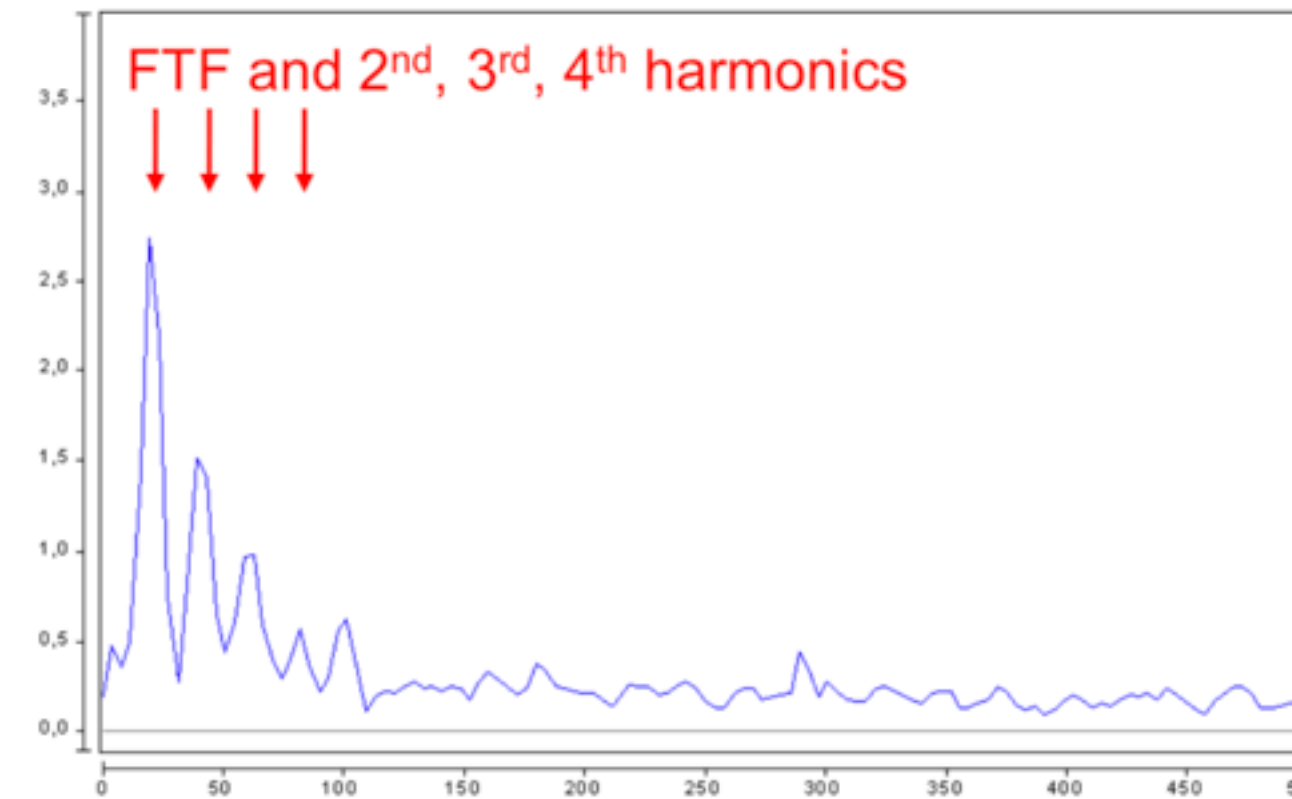
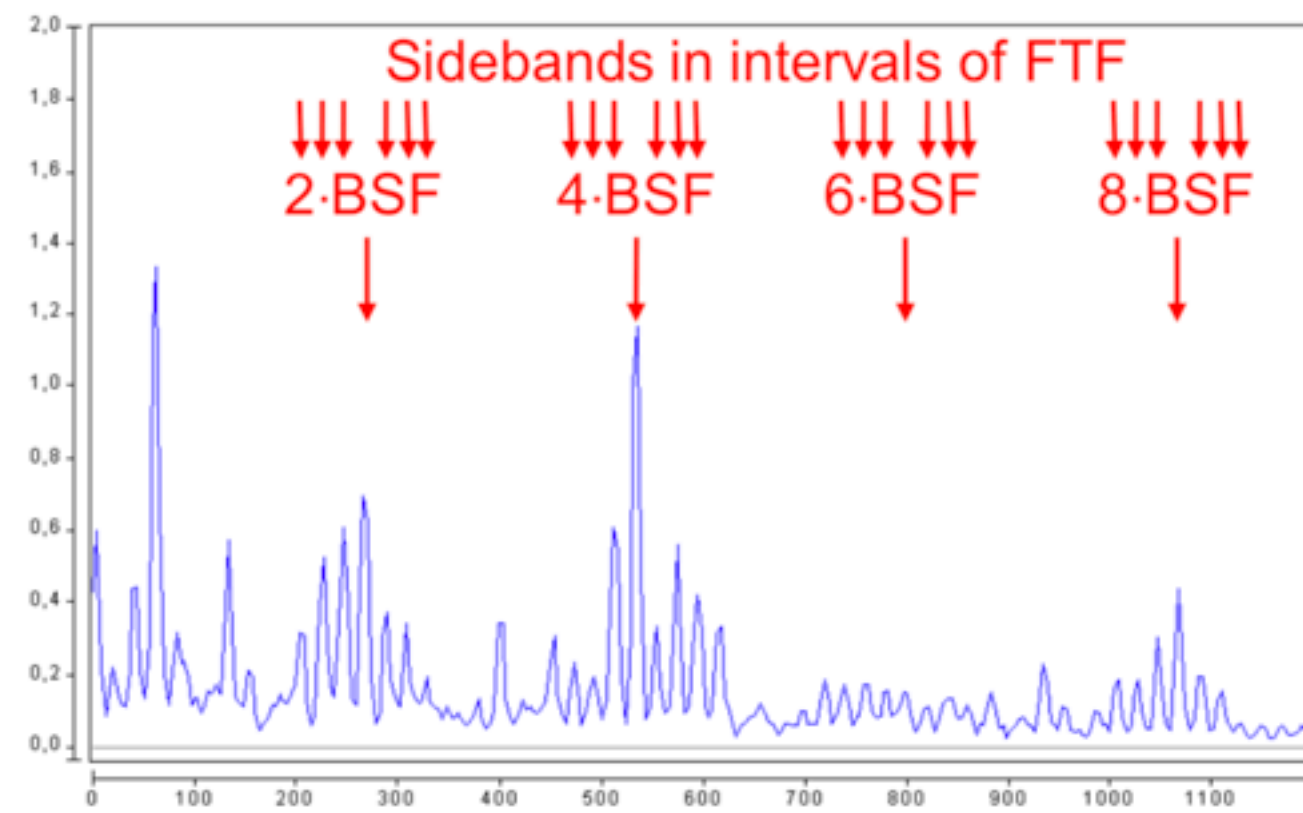
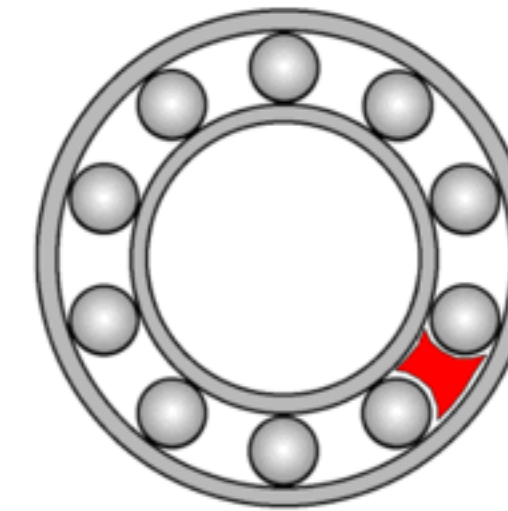


# Cuscinetti volventi.. la localizzazione del danno è facilitata dalla forma dello spettro

Danno elemento volvente  
BSF

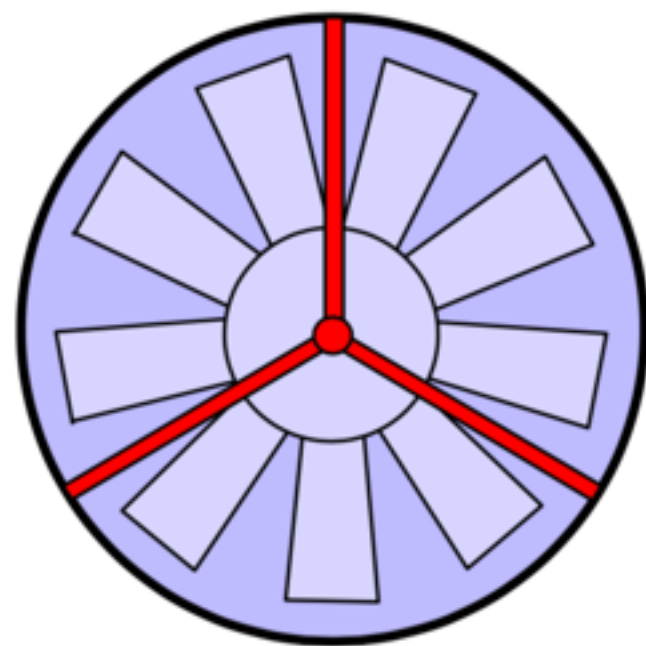
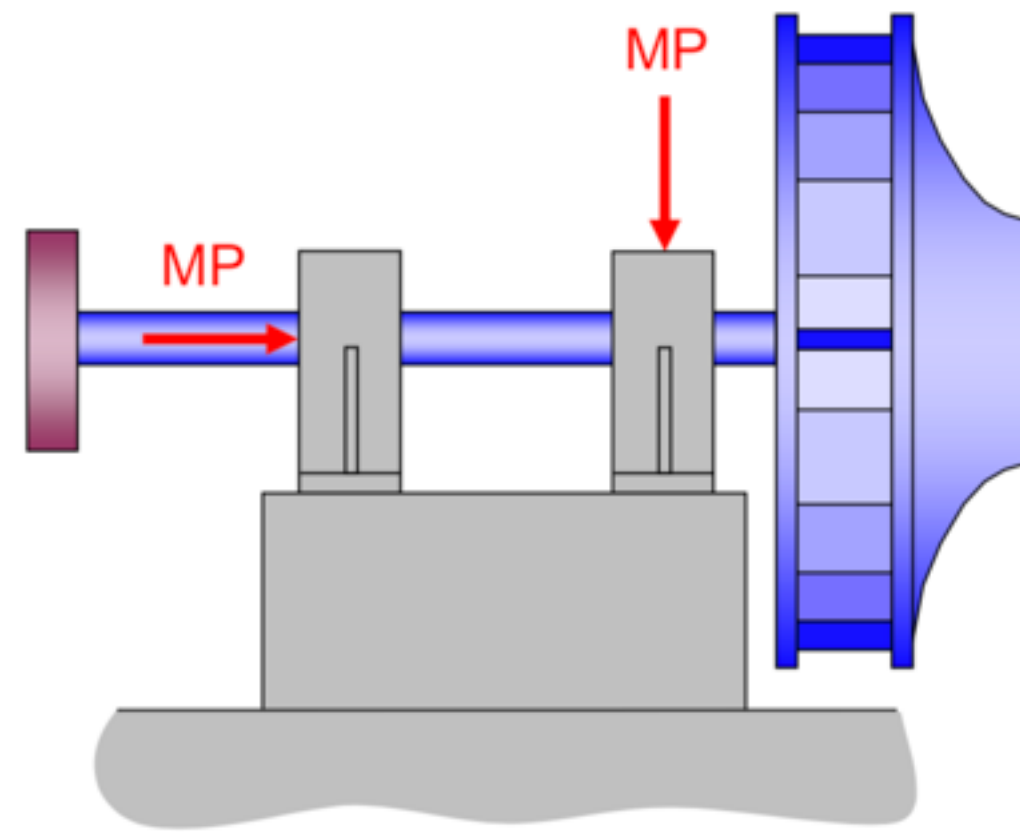


Danno gabbia  
TFT

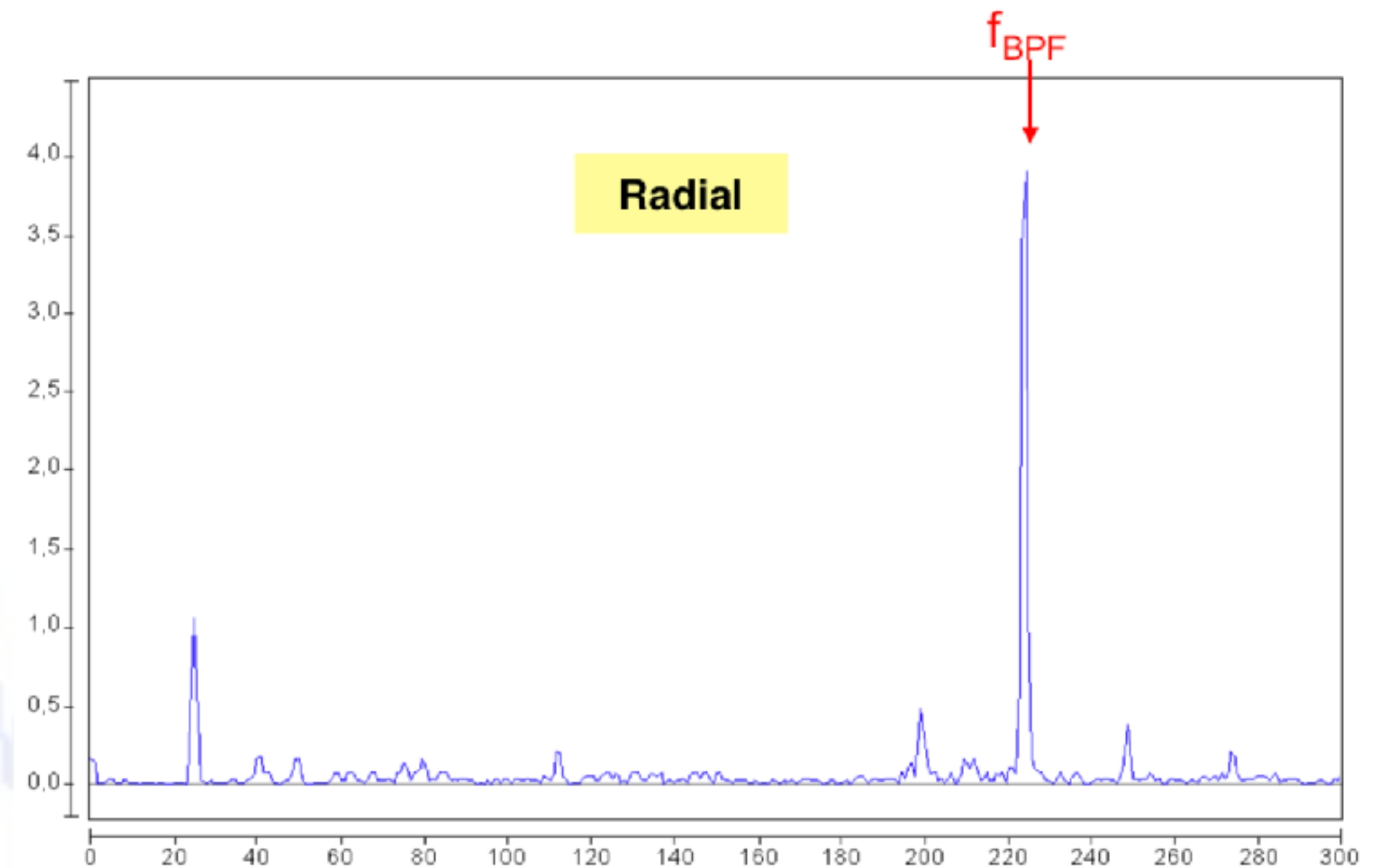


**Pale e Vani..** Le palettature delle giranti caricano periodicamente la macchina (un numero di volte al giro pari al numero di pale > armoniche proporzionali a  $N_p \times$ )

In funzione dell'aeraulica della girante, saranno rilevabili maggiormente in direzione radiale o assiale

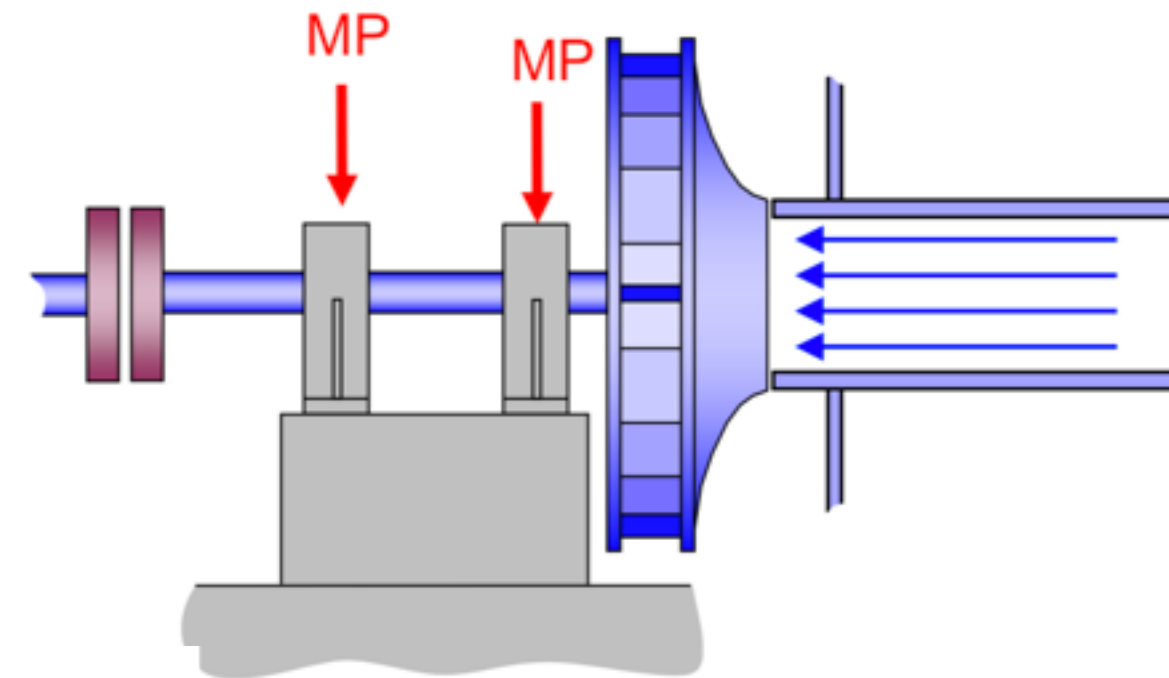


Con 9 pale e 3 supporti..  
quali saranno le frequenze  
caratteristiche del sistema?

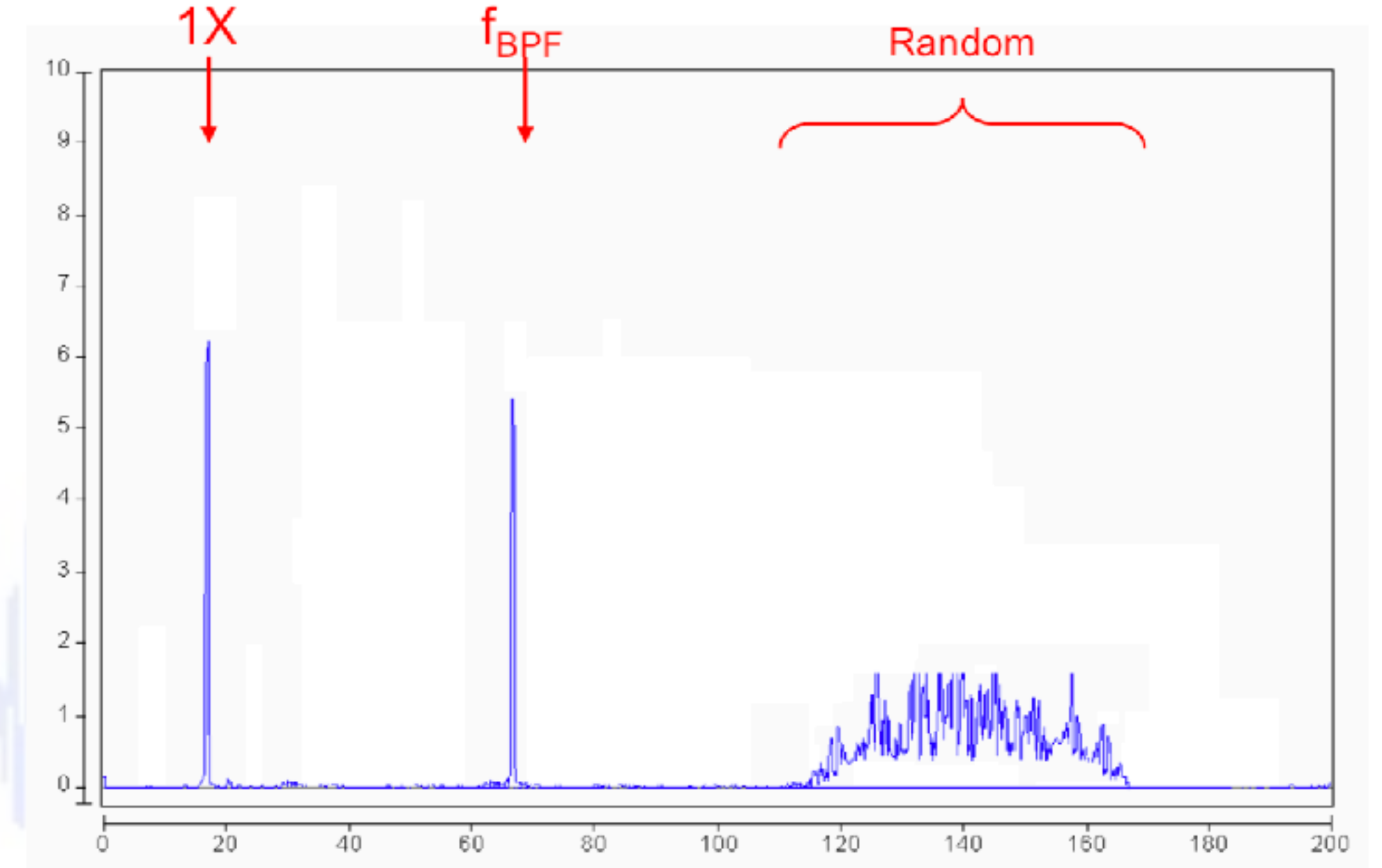
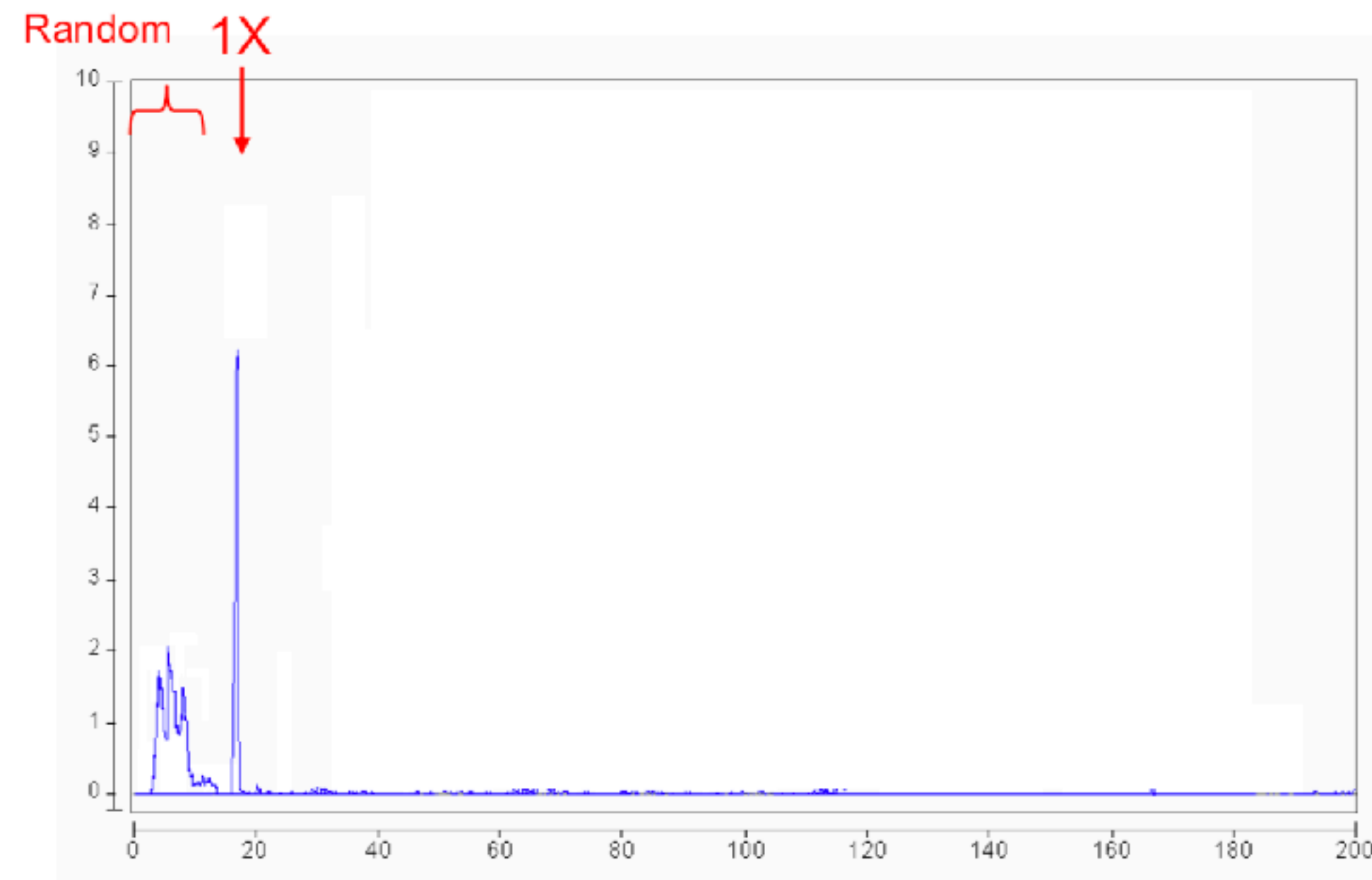


**Forze idrauliche/aerodinamiche..** il fluido che si muove nella macchine aerauliche eccita a sua volta la struttura. I fenomeni rilevabili sono Turbolenza e Cavitazione che hanno spettri con contenuto in frequenza differente

**Turbolenza**



**Cavitazione**



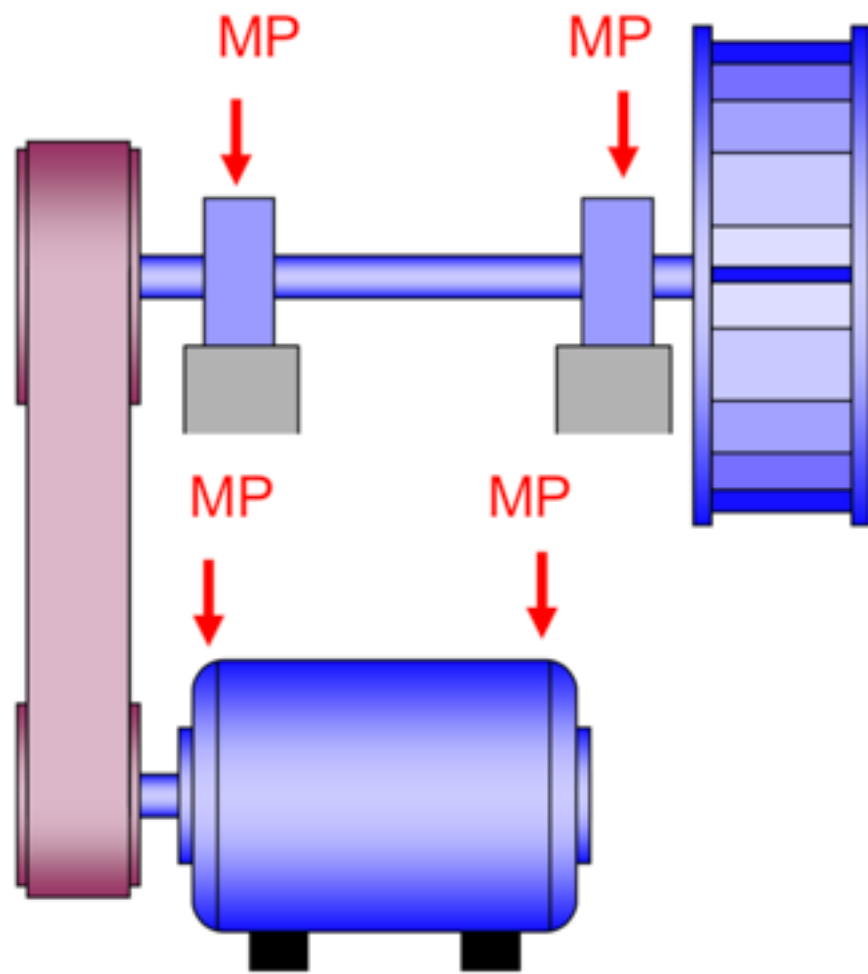
**Cinghie.** le cinghie sono elementi flessibili che collegano pulegge di diametro differente

La trasmissione di potenza con le cinghie presenta problemi legati al montaggio, all'allineamento delle pulegge, all'eccentricità delle pulegge alle risonanze del ramo non teso della cinghia, all'usura.. ciascuno con uno spettro particolare!<

$$f_B = \pi \frac{\omega_1 \phi_1}{l}$$

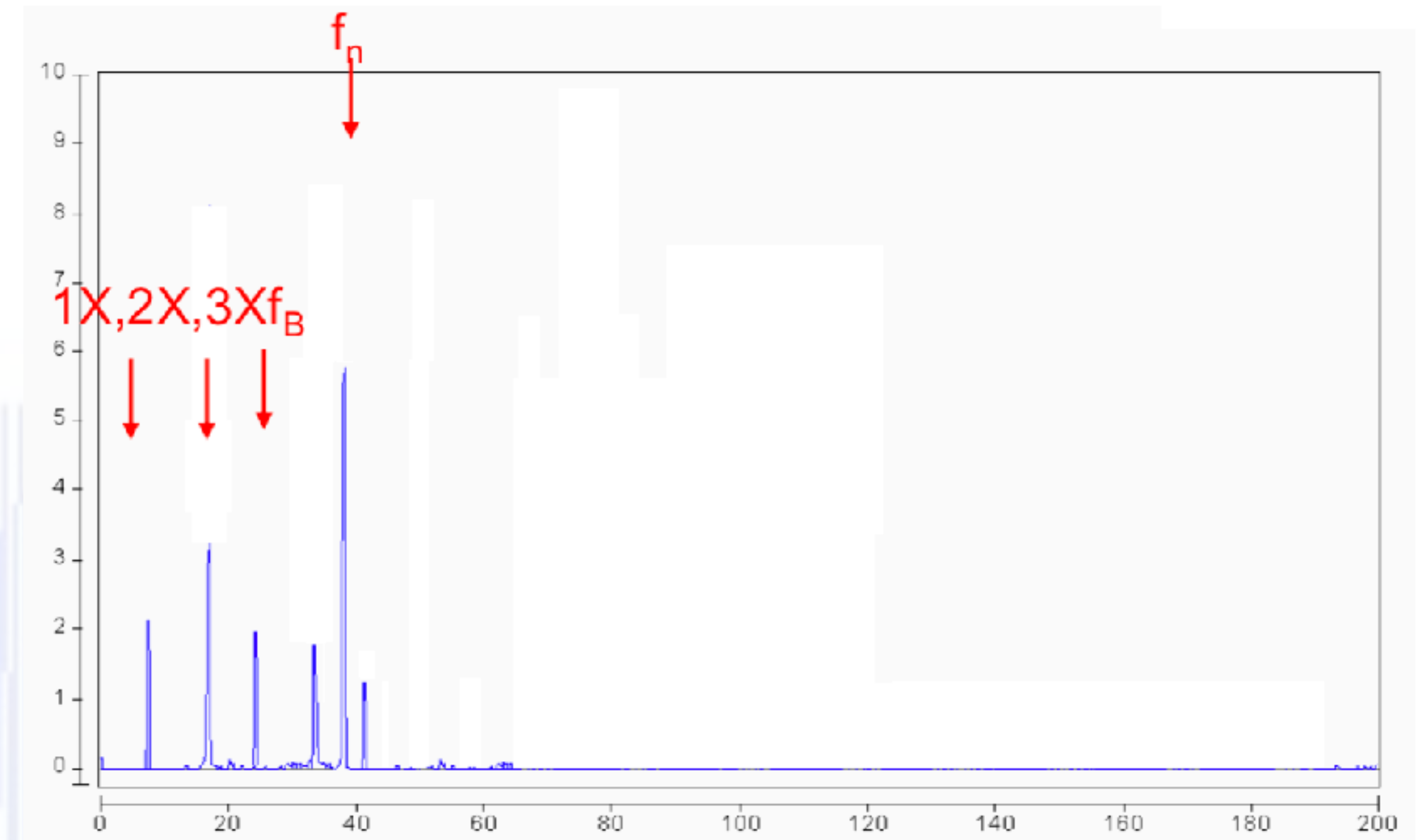
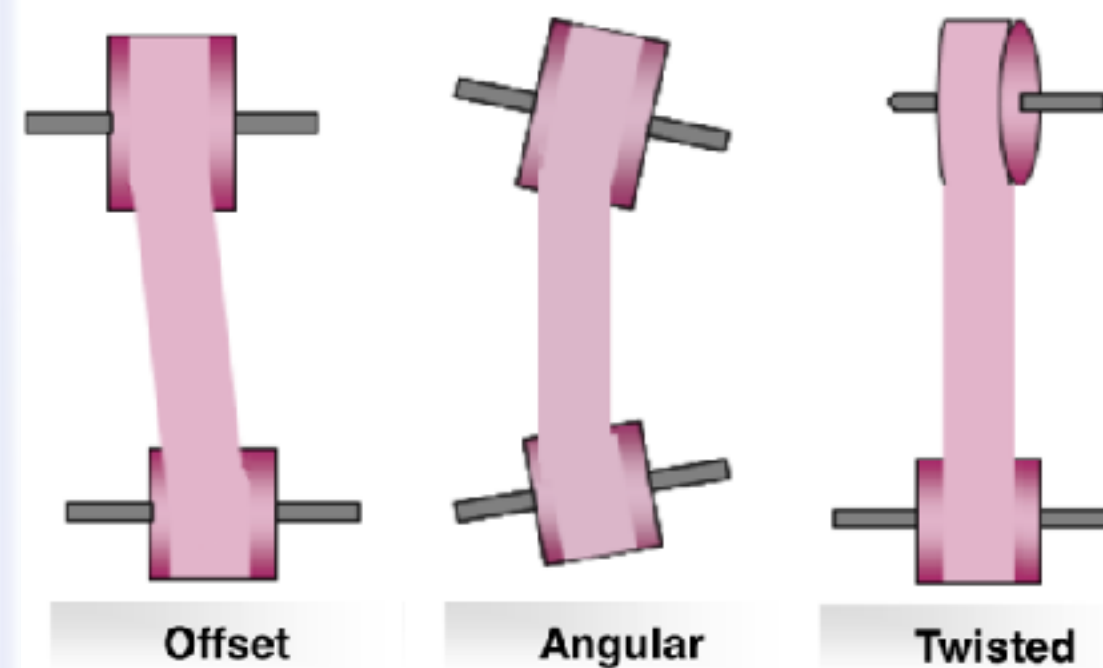
angolo di abbraccio

lunghezza cinghia



montaggio > 1x  
usura 1x 2x 3x di  $f_B$

...



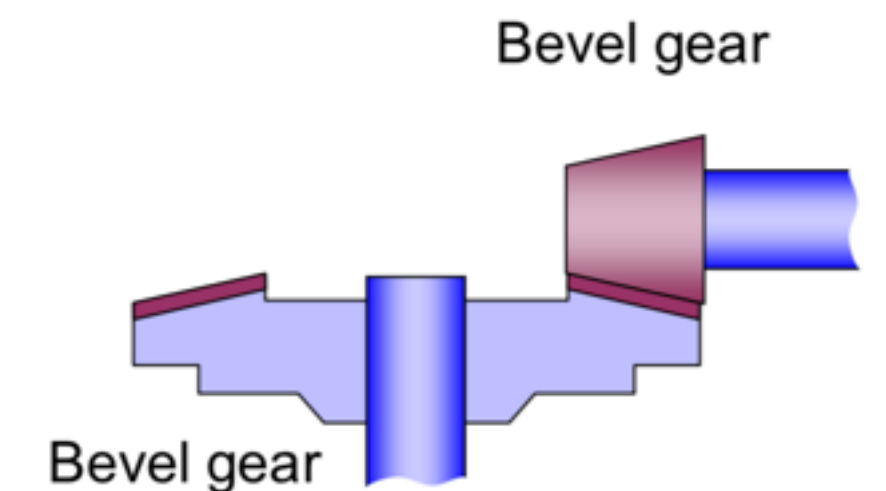
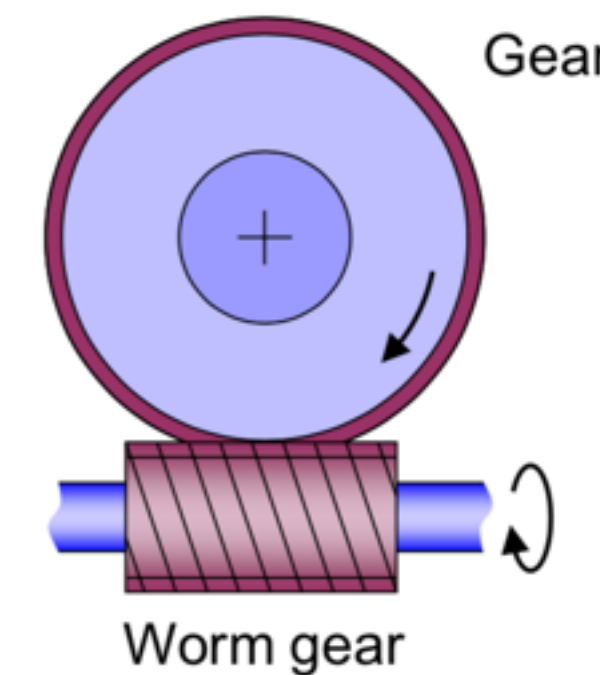
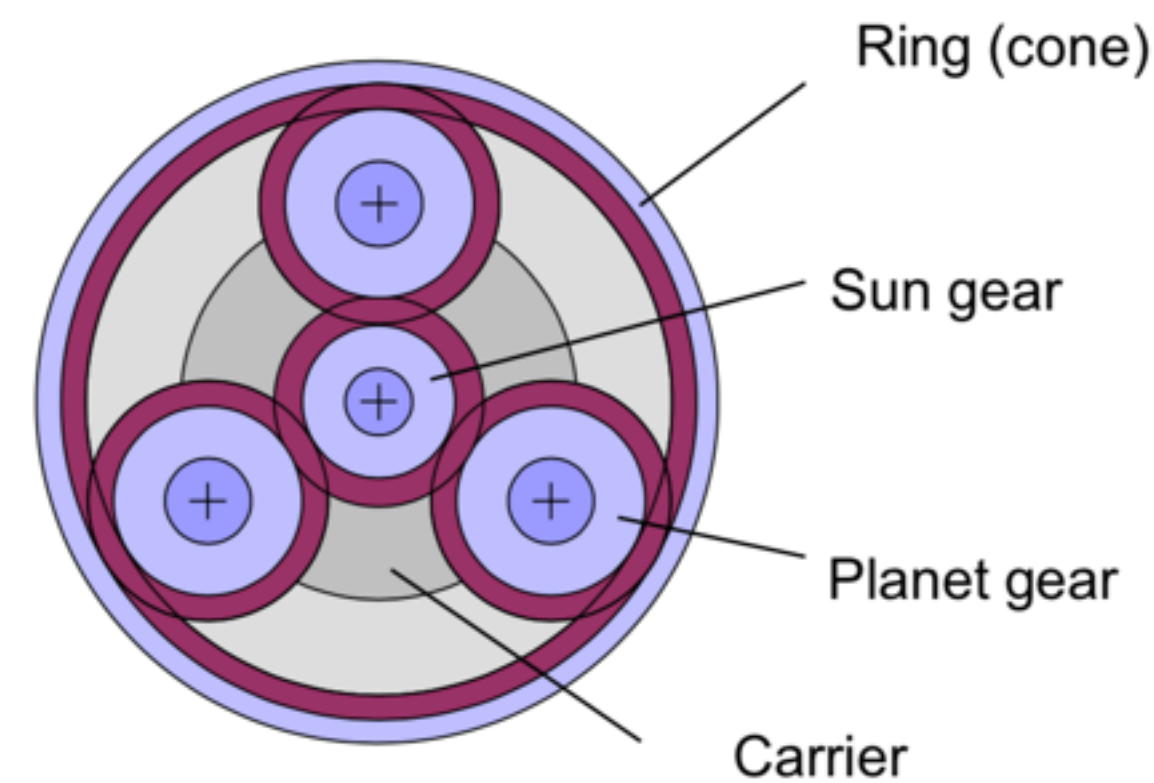
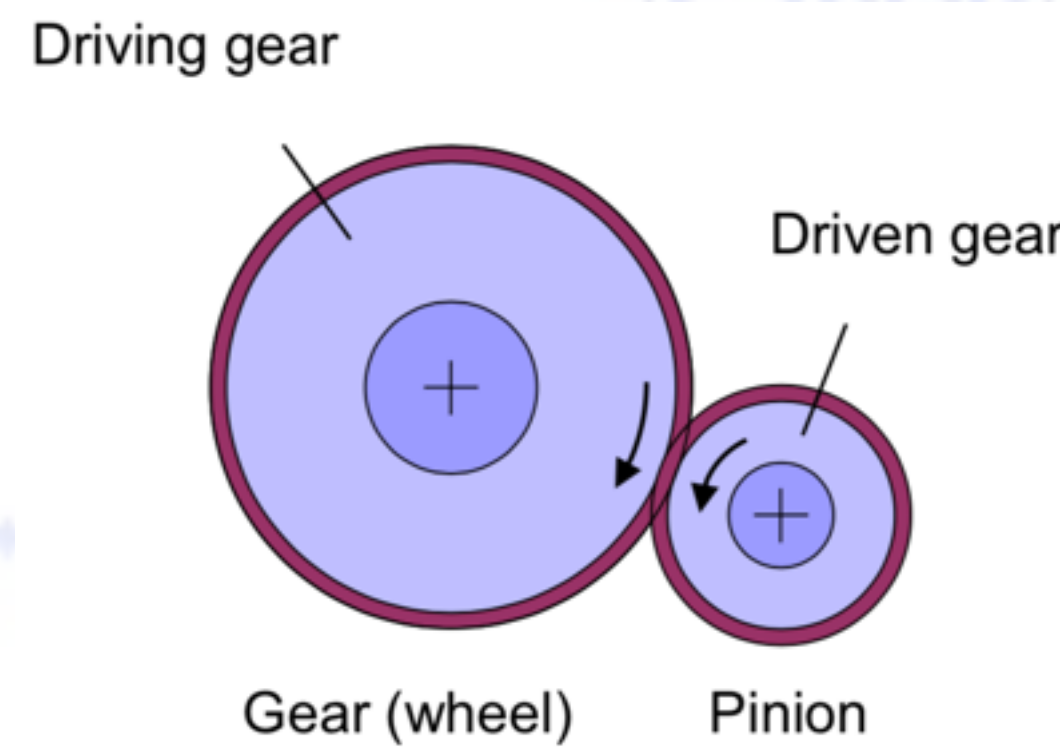
# Ingranaggi.. gli ingranaggi un comune dispositivo di trasmissione della coppia

Si distinguono ruotismi  
 Ordinari  
 Epicicloidali  
 A vite senza fine  
 A ruote coniche  
 ...

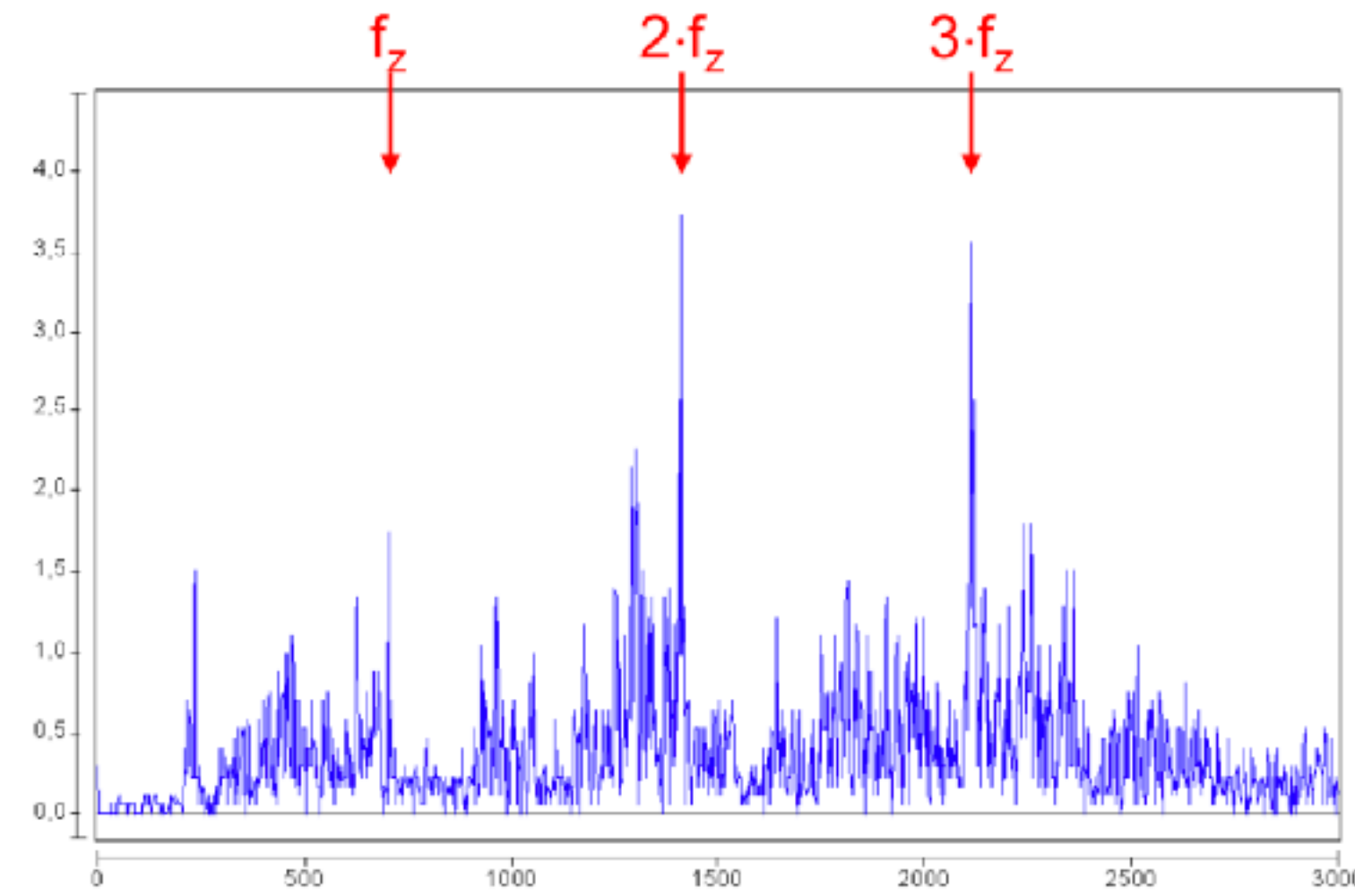
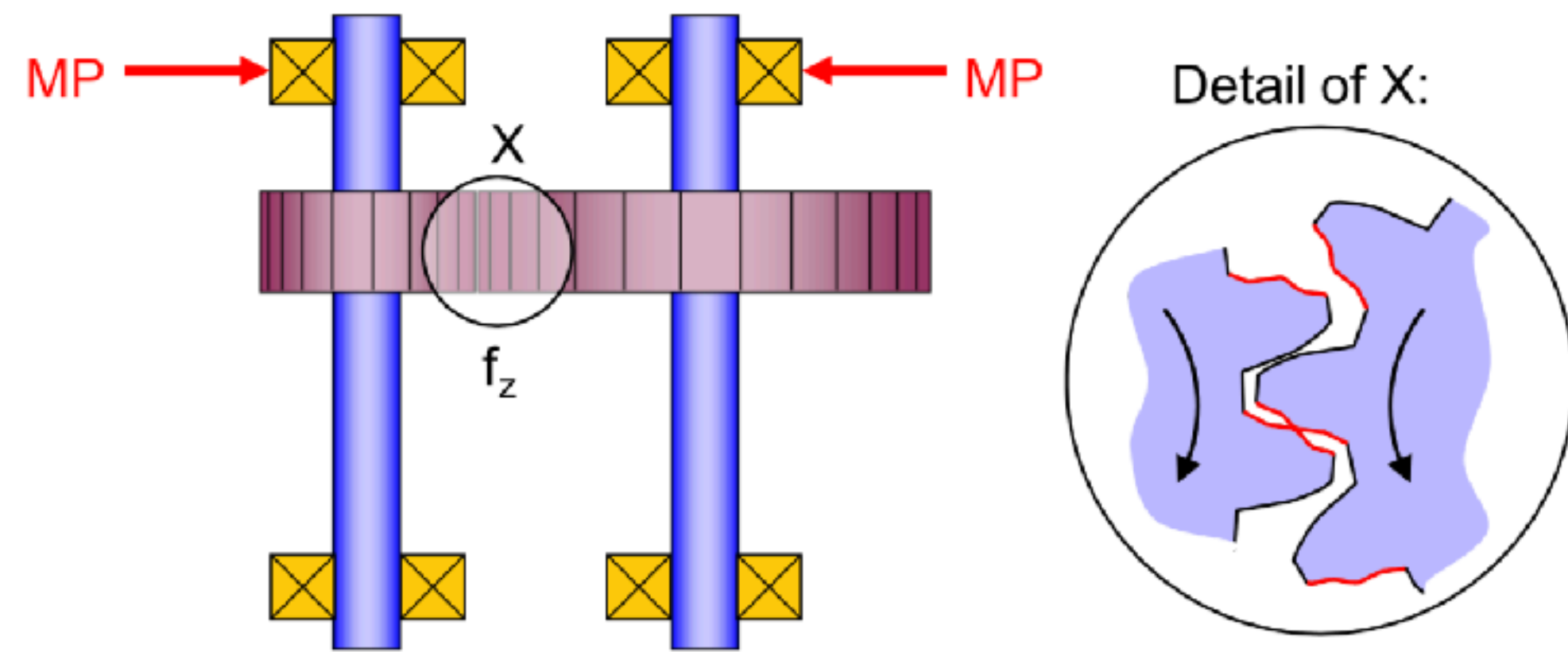
Con ruote a denti  
 Dritti  
 Elicoidali  
 ...

A funzionamento  
 Continuo  
 Intermittente  
 Reversibile  
 ..

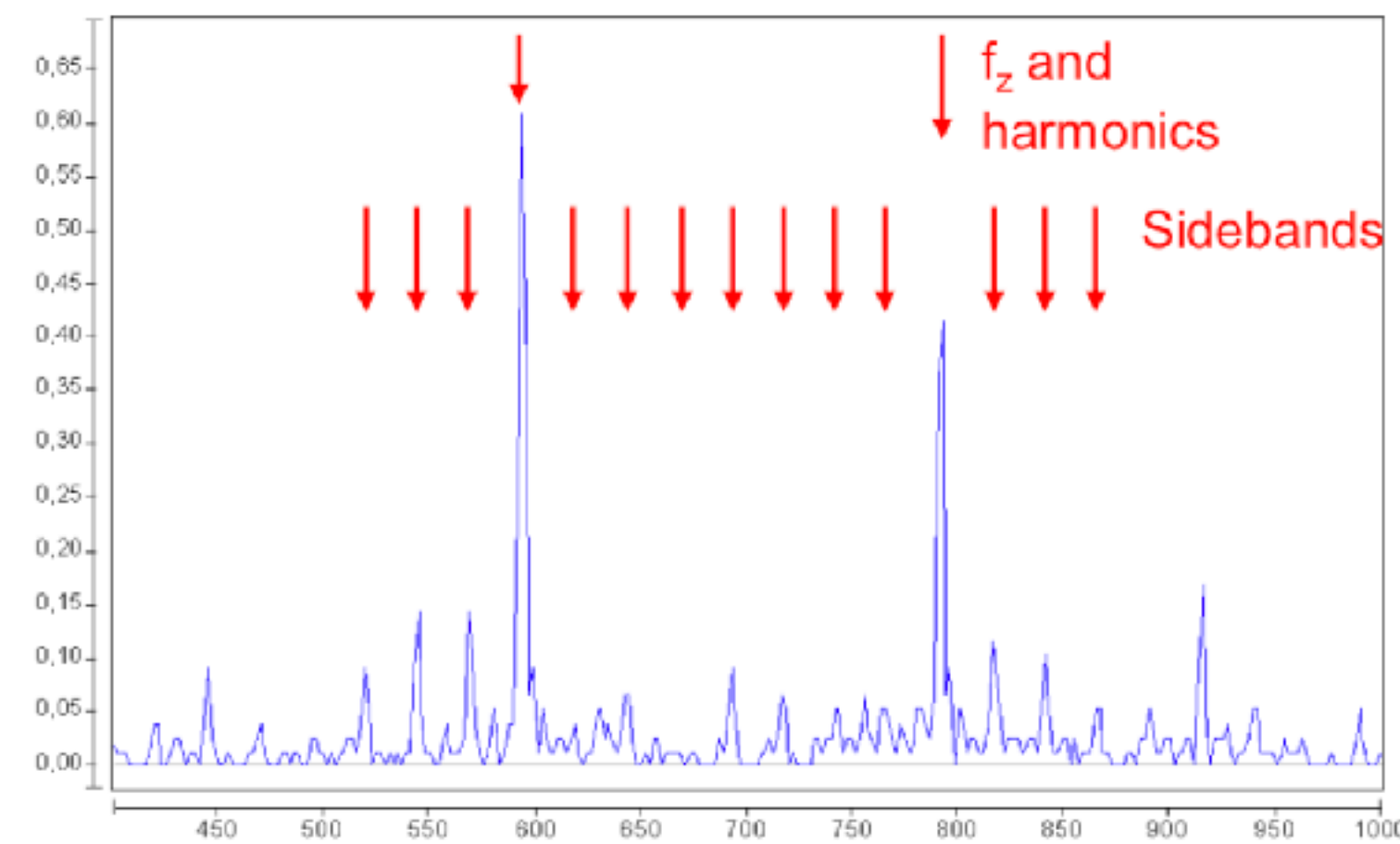
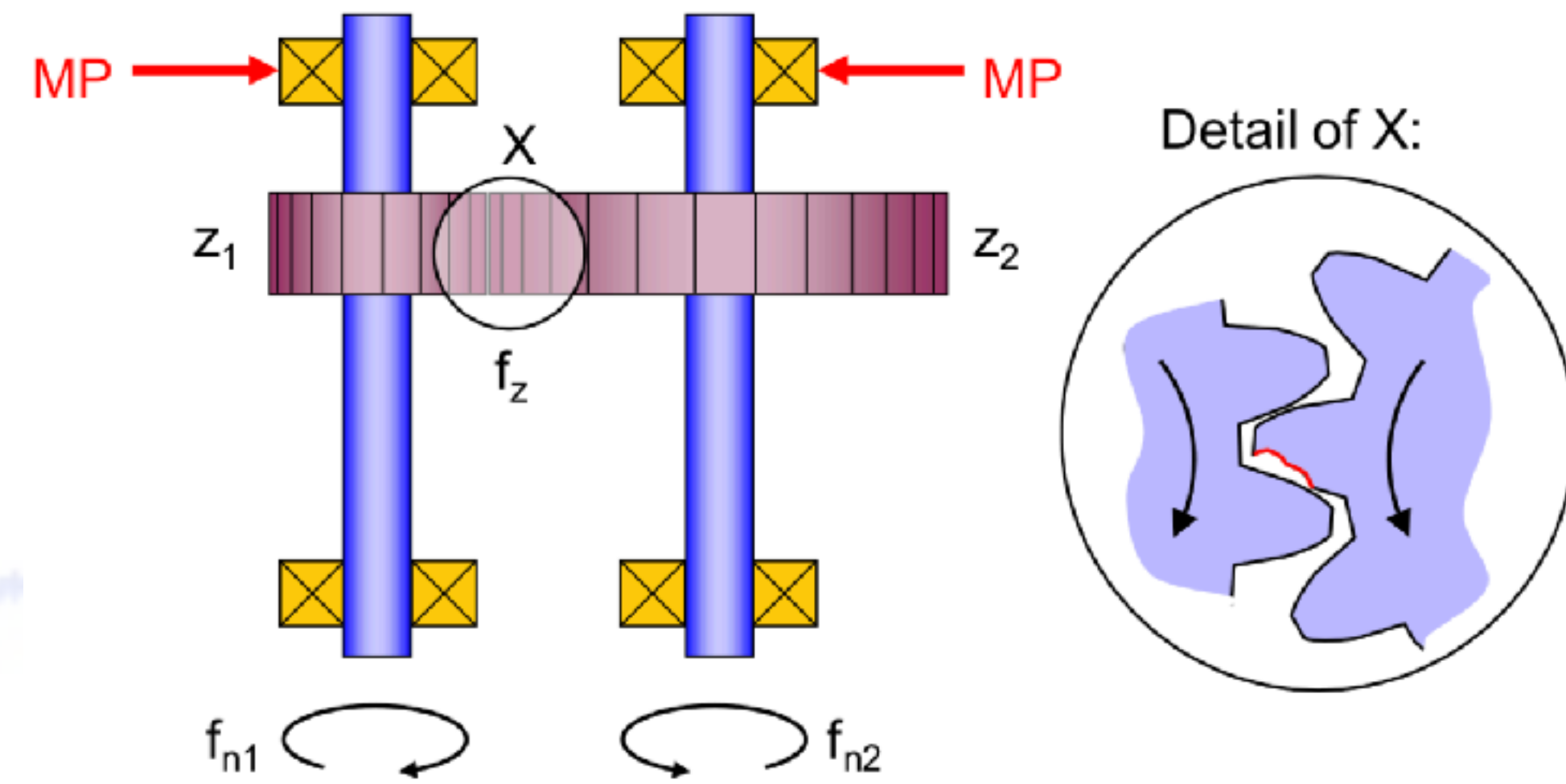
.. sarà necessario porre attenzione alla tipologie,  
 alla cinematica, alla tipologia di danneggiamento per aver le corrette frequenze di danno potenziale!



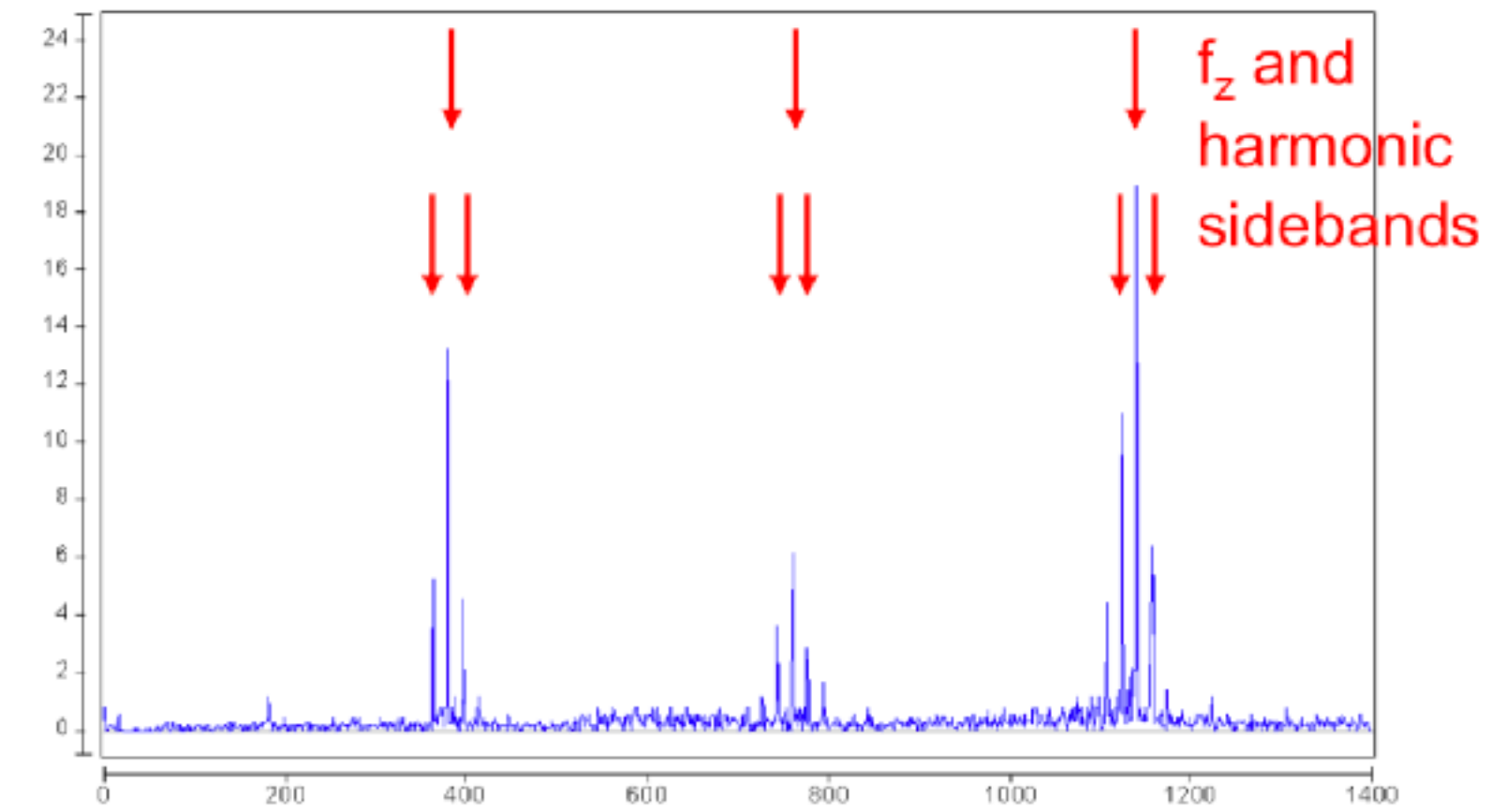
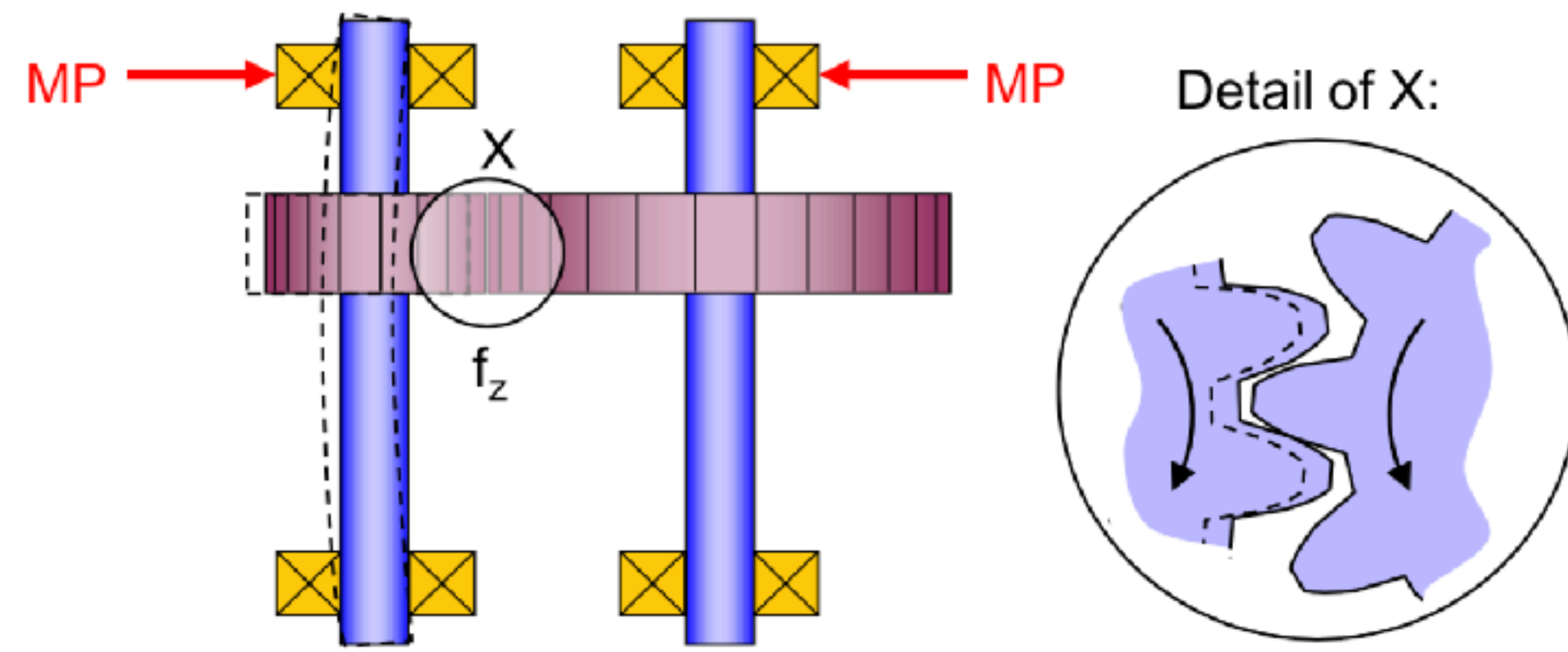
Diagnostica



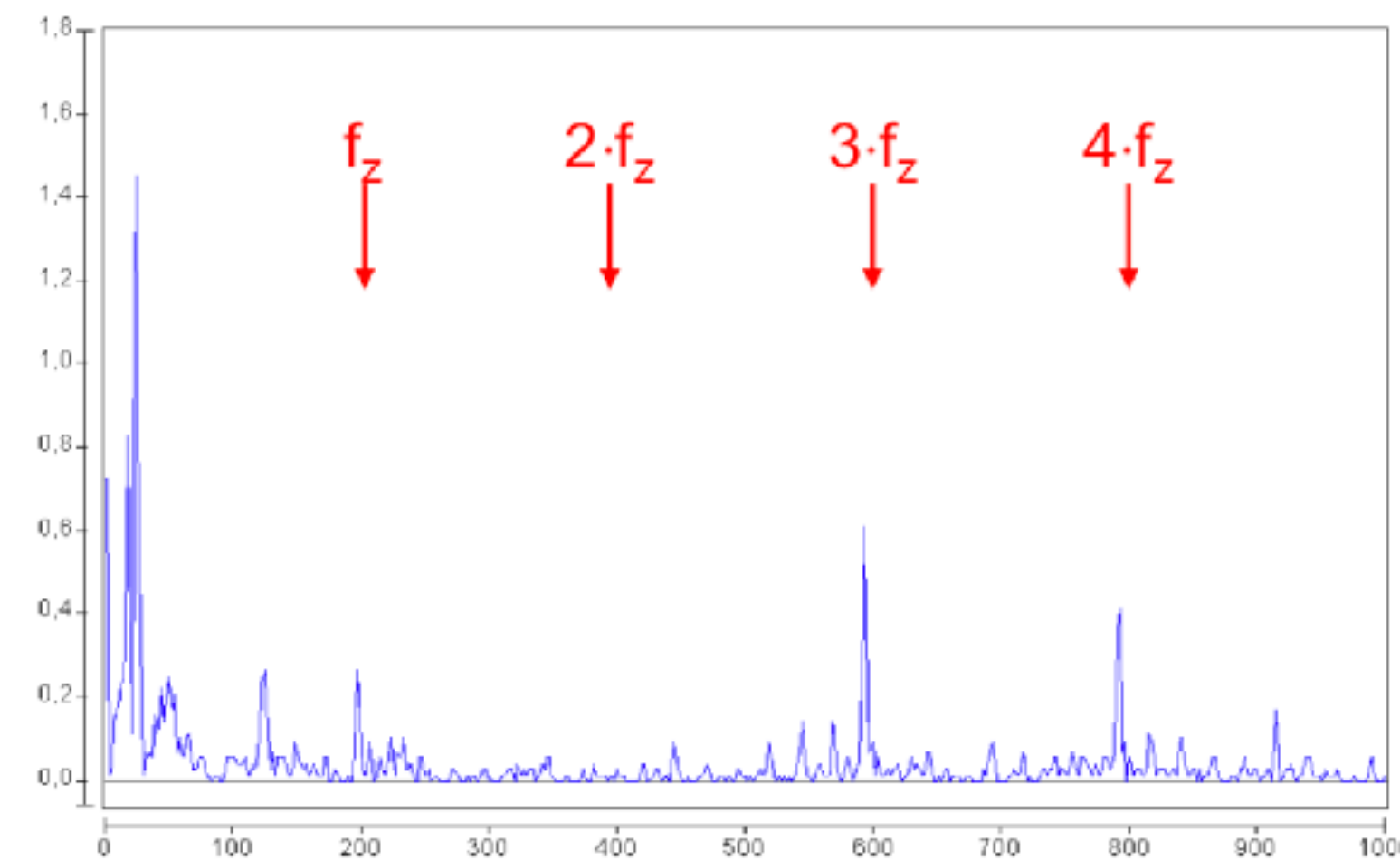
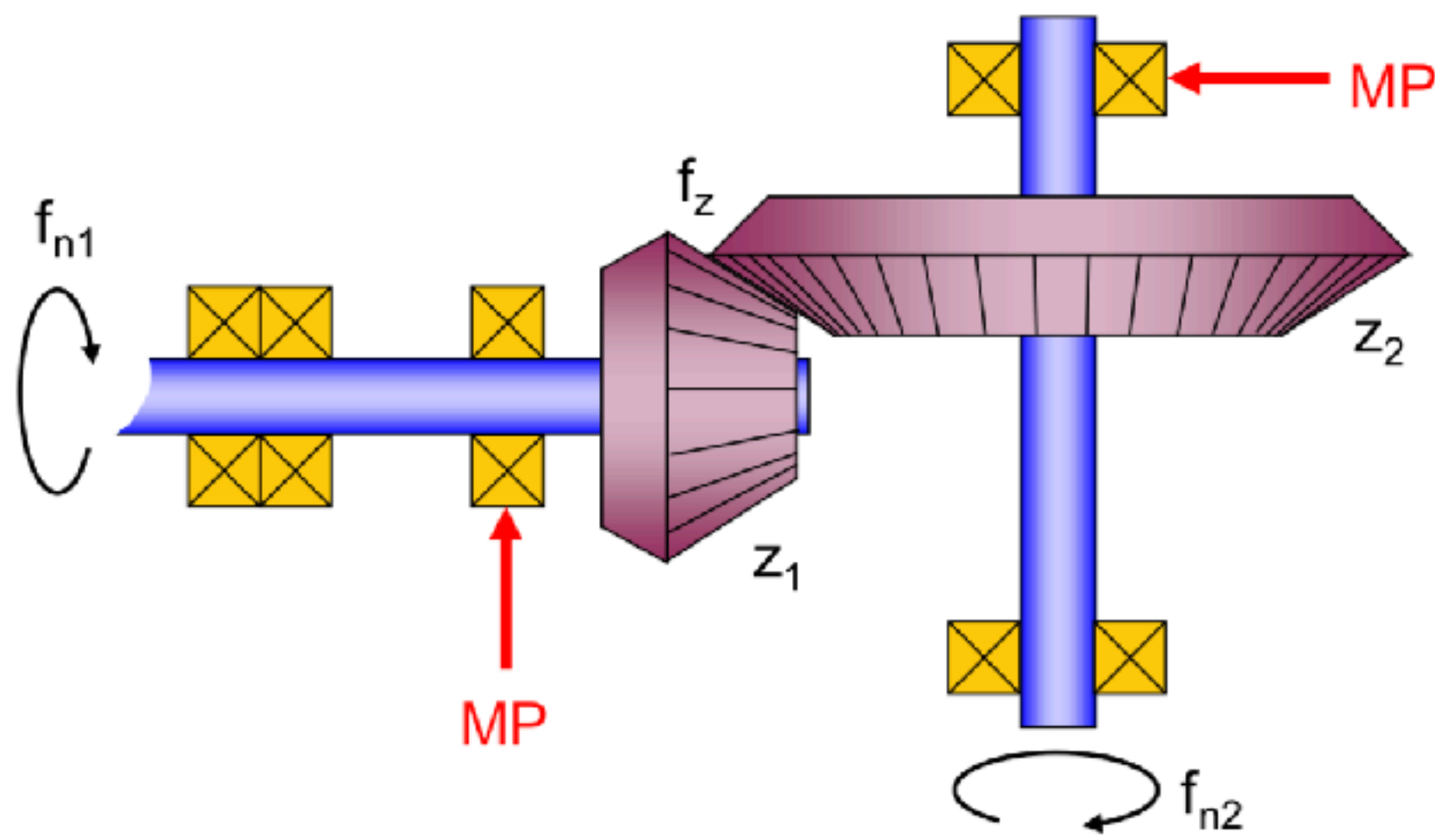
Usura



Rottura di un dente

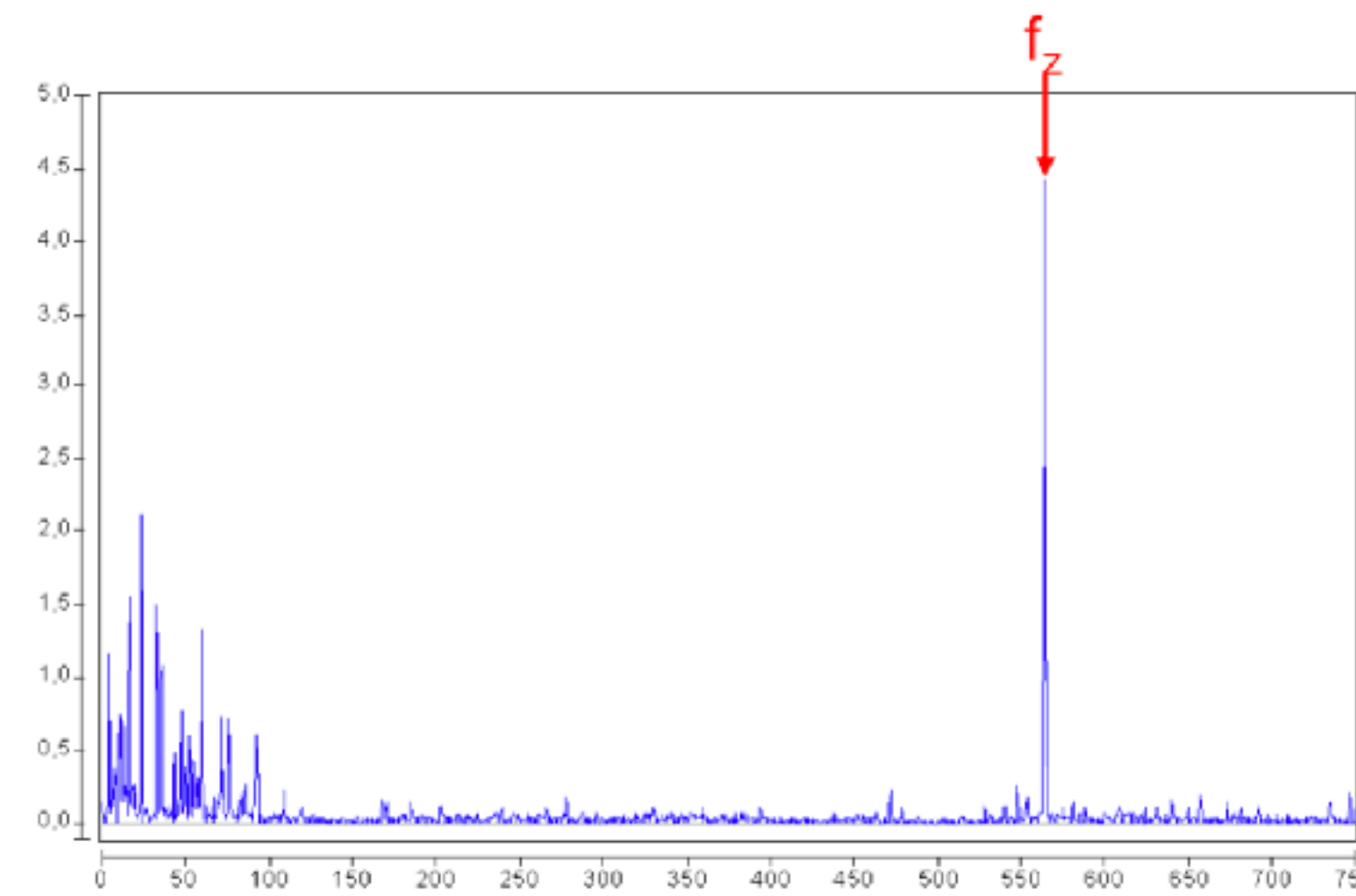
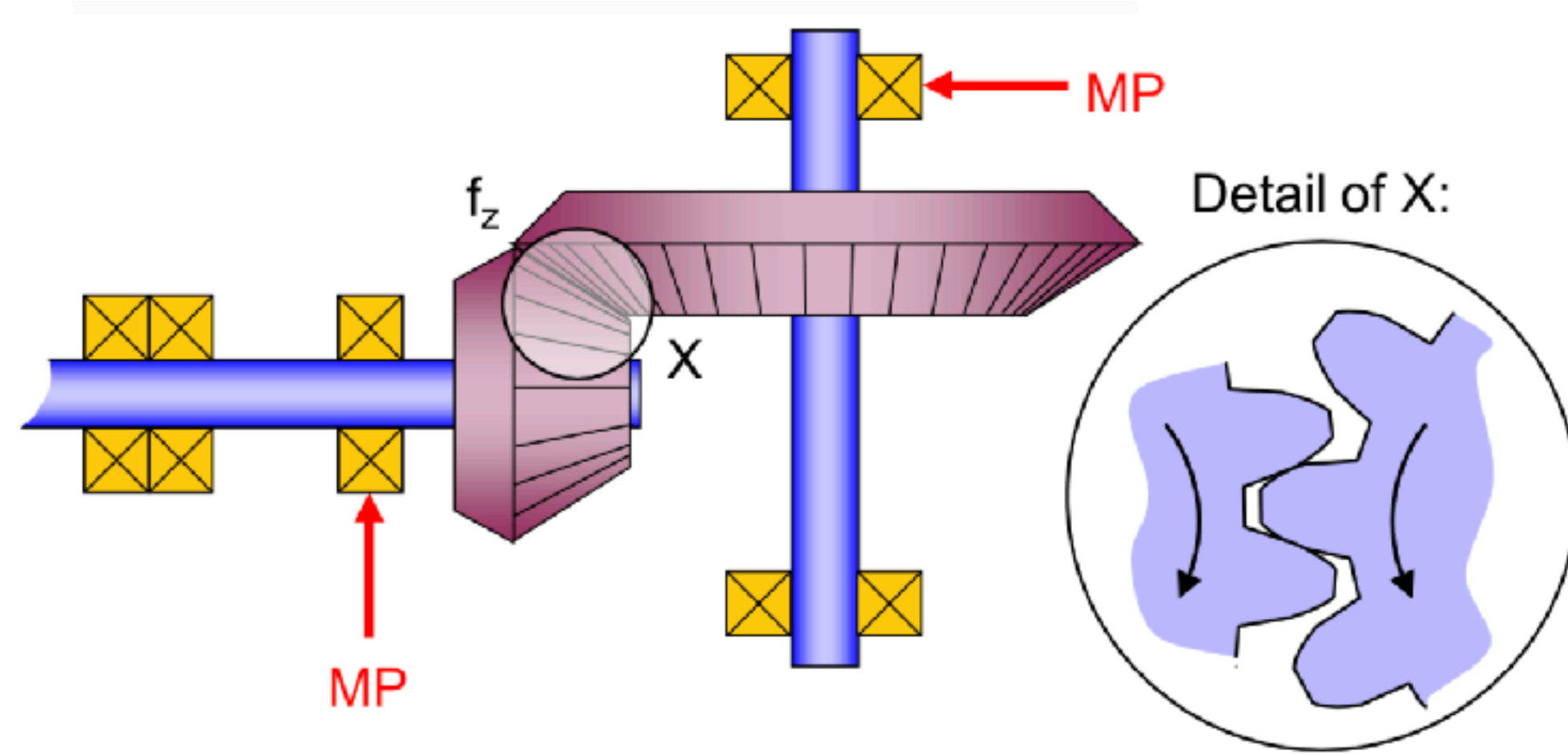


**Eccentricità  
o  
Albero piegato**



**Ingranamento  
Errato**





**Forma dente  
errata**

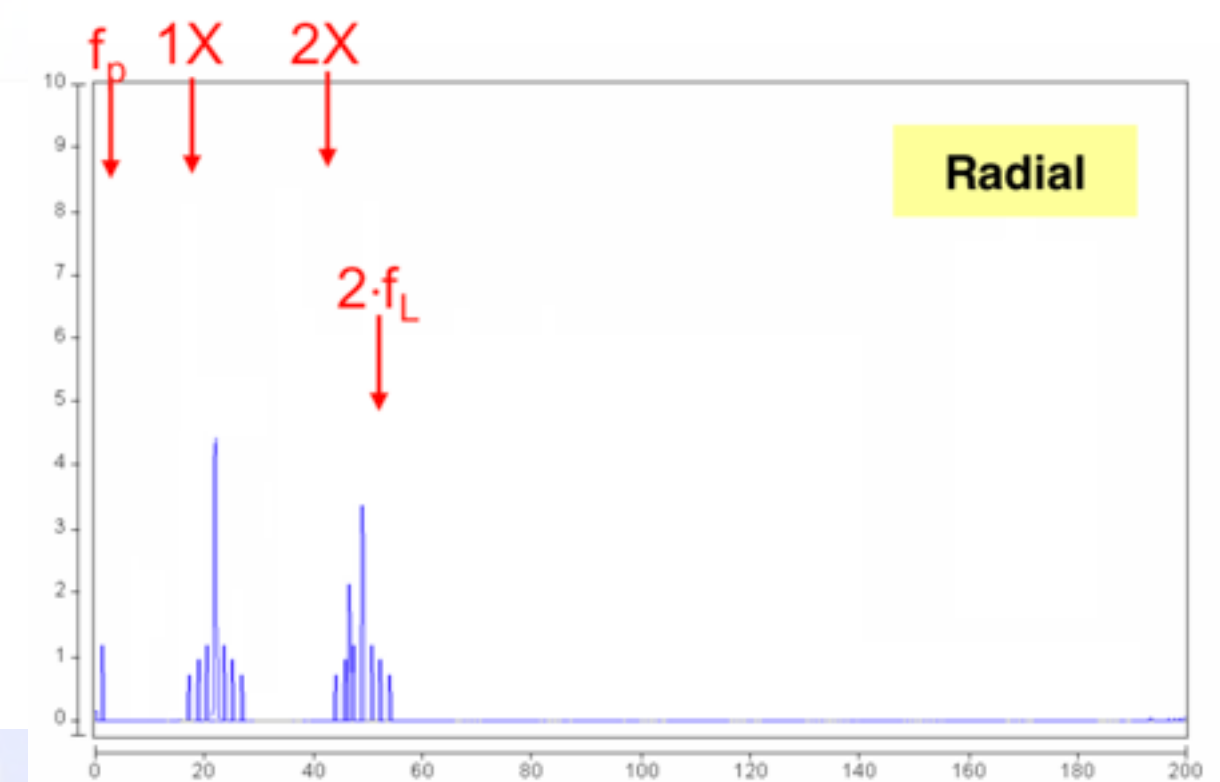
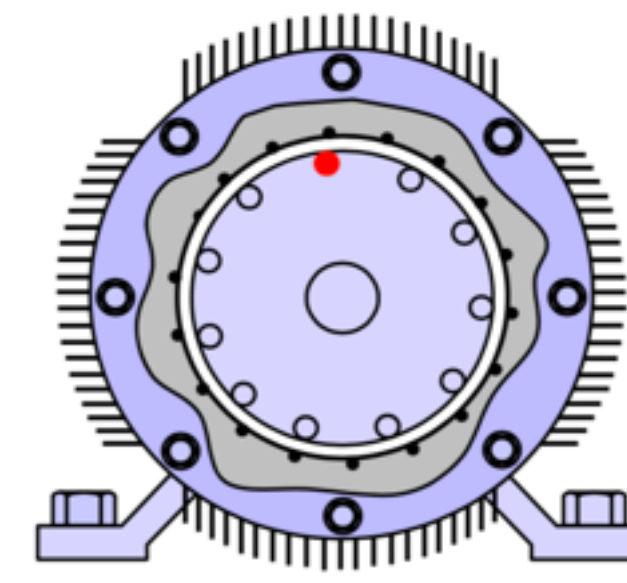
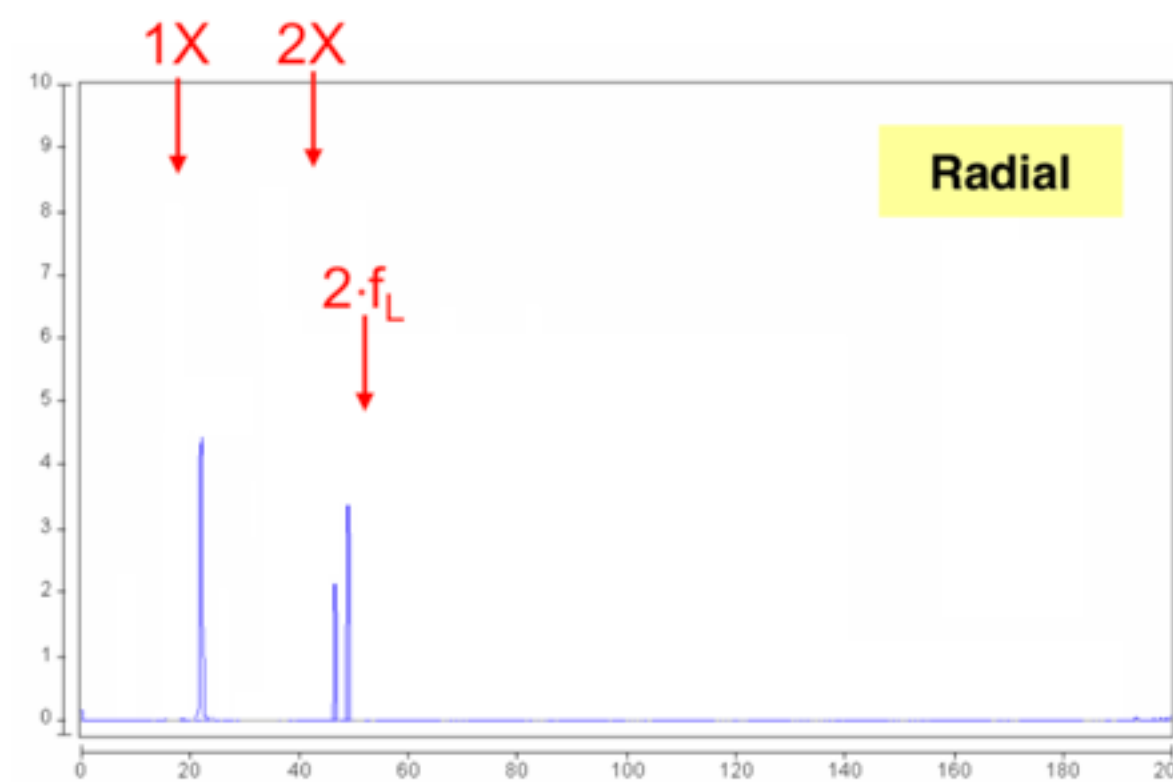
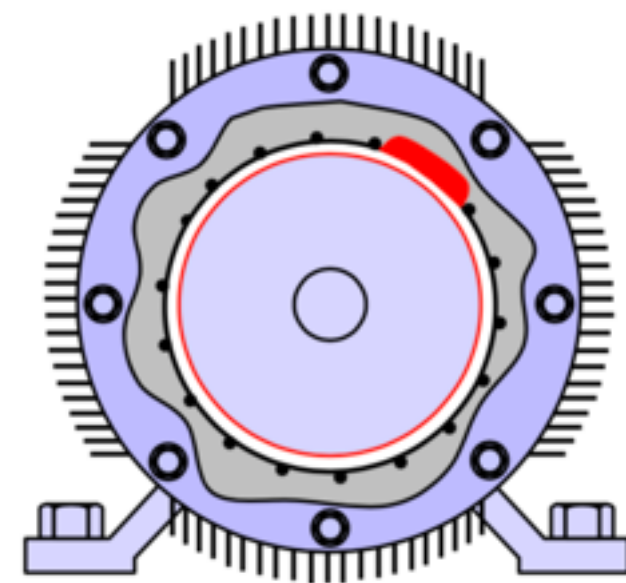
**Attenzione ai rotismi epicicloidali!**

Le velocità di rotazione che determinano le frequenze di danno devono essere opportunamente corrette con la velocità del porta-treno!

**Problemi elettrici..** i motori elettrici combinano in loro le frequenze di danno potenziale dipendenti dalle eccitazioni meccaniche e da quelle elettriche

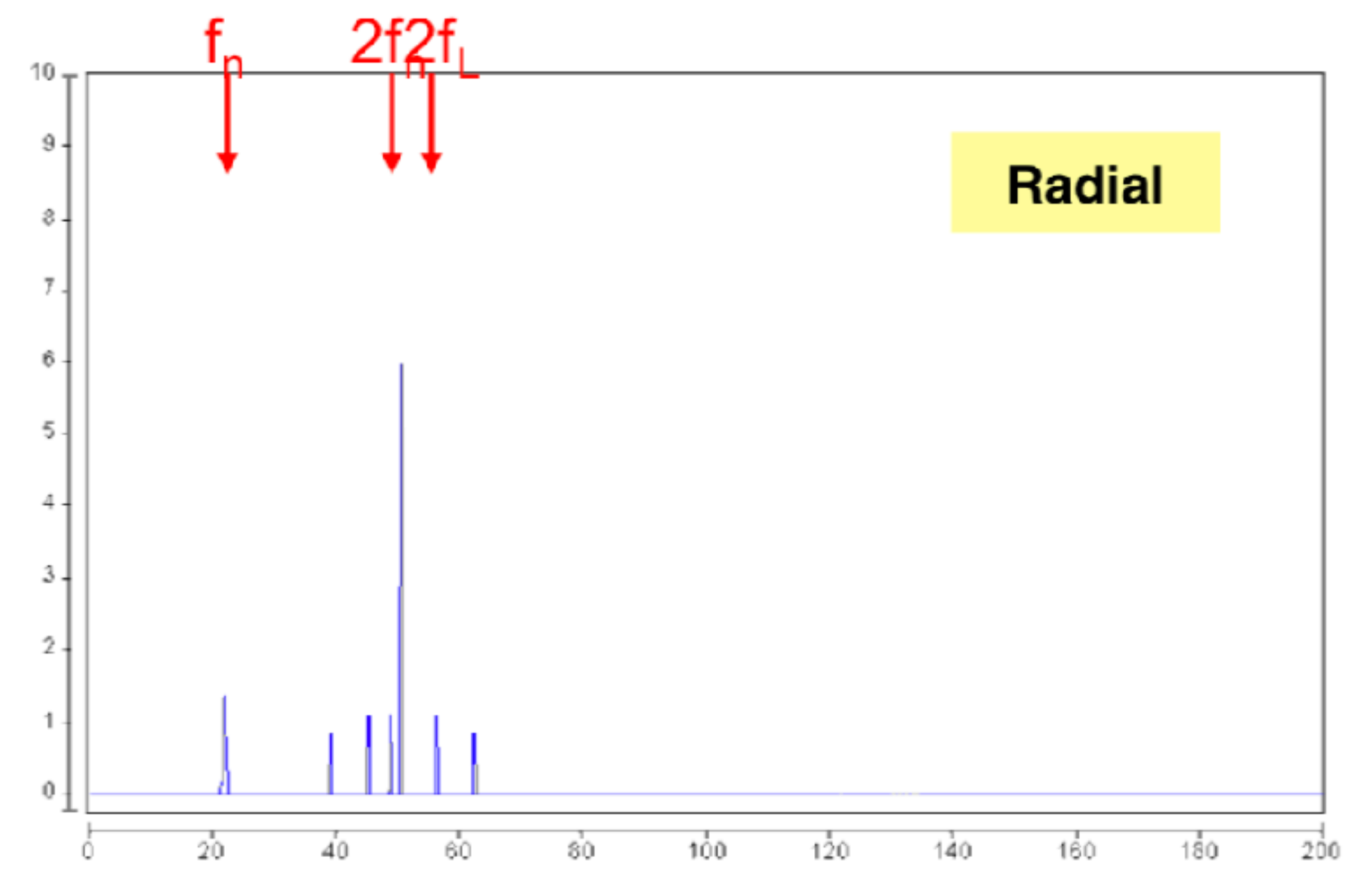
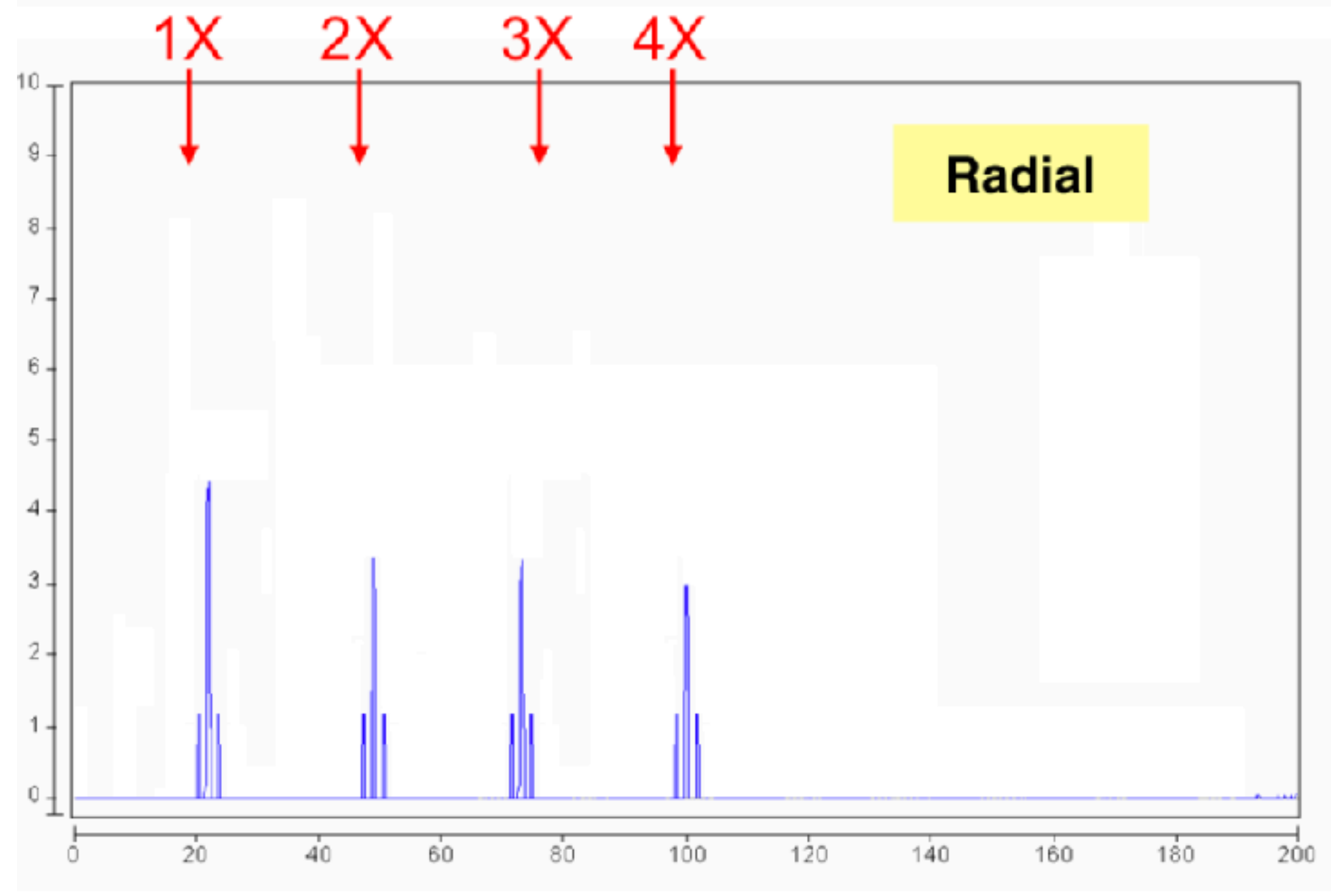
- eccentricità statore
- eccentricità rotore
- barre allentate
- barre troncate
- cuscinetti
- ..

- frequenza di alimentazione  $f_l$
- frequenza di barra (barre)  $f_{bar} = f_n * n_{bar}$
- frequenza sincrona  $f_{sync} = 2f_l / p$
- frequenze di scorrimento  $f_{slip} = f_{sync} - f_n$
- frequenza passaggio poli  $f_p = f_{slip} * p$
- frequenza di eccitazione del drive
- tiro magnetico
- cortocircuiti
- ...



### Barre rotore rotte o allentate

### Connessioni Elettriche allentate

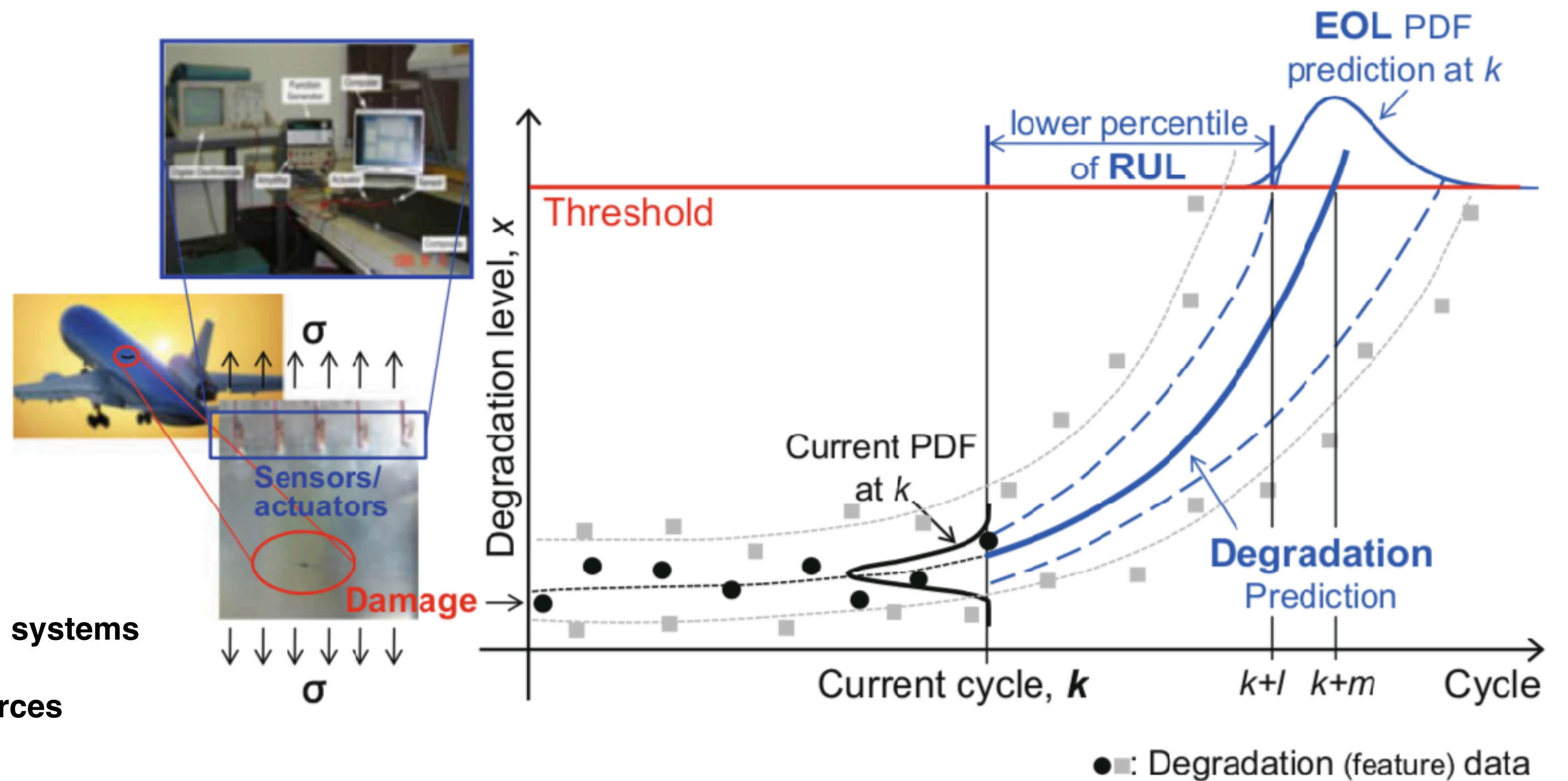


E' vietato ogni utilizzo diverso da quello inerente la preparazione dell'esame del corso di Meccanica delle Vibrazioni @Units  
E' espressamente vietato l'utilizzo per qualsiasi scopo commerciale e/o di lucro

..questo è quanto per un quadro generale sulla **diagnosi** del macchinario basata sull'analisi delle vibrazioni

Quanto manca per dover mantenere/cambiare il pezzo?

Si apre tutto un altro mondo..la **prognosi** del macchinario, ma è un altro corso!



\*Prognostic and health management of engineering systems

Nam-Ho Kim, Dawn An, Joo.ho Choi

\*Data driven modelling using matlab in water resources

and environmental engineering

Shahab Araghinejad

