

La rumorosità degli ingranaggi (Parte 1^)

Il problema del rumore generato dalle trasmissioni è diventato sempre più pressante negli ultimi anni, anche a causa della maggiore esigenza di combattere l'inquinamento acustico, specie negli ambienti di lavoro.

Inoltre nell'industria dell'autotrazione, minor rumore è quasi sinonimo di migliore qualità. E' sostanzialmente per questi motivi che la lotta al rumore si è fatta più accanita negli ultimi tempi.

La genesi e la trasmissione del rumore prodotto da una coppia di ingranaggi, o più generalmente, il rumore che esce da una scatola cambio o da un riduttore o da un rotismo qualsiasi, è un fenomeno tra i più studiati ed analizzati nel campo della meccanica.

Gli approcci a questo problema possono essere di vario tipo: si va dai tentativi empirici di modifica delle caratteristiche geometriche delle ruote, all'applicazione di softwares già collaudati, ad *"eleganti ed alquanto esoteriche analisi matematiche"*, come dice J.Derek Smith della Cambridge University (U.K.) nel suo *Gear Noise and Vibration*.

Sul problema della rumorosità sono stati scritti in tutto il mondo molte centinaia di articoli e studi più o meno approfonditi. Per esempio, nel solo Manuale degli Ingranaggi (D.W. Dudley – D.P. Townsend) (Tecniche Nuove) a conclusione del capitolo sulla rumorosità degli ingranaggi sono citati ben 79 titoli.

Per questo motivo su questo argomento è molto difficile dire cose nuove: è già stato detto tutto ed è anche evidente che in questo breve scritto non si possono affrontare in modo completo tutte le problematiche connesse al rumore degli ingranaggi, ma egualmente credo sia utile a molti lettori fare un riepilogo dei concetti consolidati relativi a questo argomento.



Figura N°1- Accoppiamento di due ingranaggi cilindrici elicoidali.

In effetti bisognerebbe più propriamente parlare di rumore delle trasmissioni piuttosto che rumore degli ingranaggi, perché le vibrazioni indotte da un imperfetto ingranamento sono trasmessi, amplificate o attenuate attraverso i corpi degli ingranaggi, ai supporti degli alberi, ai cuscinetti ed infine alla carcassa della scatola cambio.

Quindi è tutto il sistema che viene coinvolto in questo fenomeno e, schematizzando un po', si può dire che la strada che il rumore segue sia la seguente.

- *Eccitazione da ingranamento*
- *Vibrazioni torsionali e laterali e risonanza del corpo degli ingranaggi*
- *Forze dinamiche di ingranamento e sui cuscinetti*

- *Interazione tra cuscinetti e scatola*
- *Vibrazioni della scatola*
- *Superfici radianti ed altri percorsi delle vibrazioni*
- *Rumore generato*

Molta importanza ha l'analisi delle frequenze che compongono il rumore.

L'onda sonora percepita dall'orecchio umano è composta da una serie di frequenze che si sovrappongono alla frequenza primaria; si tratta delle varie armoniche di intensità più o meno grande, che possono venire rappresentate da una serie di Fourier. Esse determinano il carattere del suono trasmesso.

La frequenza primaria (o frequenza di ingranamento), è funzione del numero di denti dei due ingranaggi e dalla velocità di rotazione (numero di giri); essa si calcola con le seguenti formule:

$$f_m = f_{s1} \cdot Z_1 = f_{s2} \cdot Z_2$$

con $f_{s1} = \frac{N_1}{60}$ $f_{s2} = \frac{N_2}{60}$ $f_{s2} = \frac{N_2}{60} = f_{s1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}$.

dove si ha:

f_{s1} = frequenza dell'albero conduttore

f_{s2} = frequenza dell'albero condotto

f_m = frequenza di ingranamento

N_1 , N_2 , Z_1 , Z_2 = sono rispettivamente il numero di giri ed il numero di denti della ruota conduttrice e di quella condotta.



Figura N°2- Gruppo di ingranaggi di vario tipo (per esterni cilindrici elicoidali ed a denti dritti, per interni elicoidali e a denti dritti, conici, per catene).

Principali cause di generazione del rumore

Gli elementi più importanti che generano rumore durante il funzionamento di un accoppiamento tra due ingranaggi sono abbastanza bene individuati e sono i seguenti.

- *Variazione della rigidità di ingranamento.* Per rigidità di ingranamento si intende il rapporto tra la forza tangenziale lungo la retta d'azione e la flessione del dente in quella direzione. Bisogna notare che la forza applicata su un dente è variabile come intensità, come direzione e come punto di applicazione. Ne consegue che la flessione del dente è continuamente variabile. Il caso più eclatante si verifica negli ingranaggi a denti dritti, con rapporto di condotta inferiore a 2. In questo caso si alternano due coppie di denti in presa con una sola coppia; si può facilmente intuire la forte variazione di carico e di flessione su ogni singolo dente.

Questa condizione è evidentemente da evitare. Normalmente essa può verificarsi solo con accoppiamenti di ingranaggi a denti dritti, mentre sugli ingranaggi a denti elicoidali il rapporto di condotta totale è generalmente superiore a 2, per cui si hanno sempre almeno due coppie di denti in presa.

Si distinguono quindi gli ingranaggi LCR (Low Contact Ratio), cioè ingranaggi con un rapporto di ricoprimento inferiore a 2, e gli ingranaggi HCR (High Contact Ratio), cioè ingranaggi con rapporto di ricoprimento superiore a 2.

- *Errore di trasmissione.* E' la differenza tra la posizione effettiva dell'ingranaggio condotto e la posizione che esso occuperebbe nel caso di una coniugazione perfetta. E' il fattore principale nella generazione del rumore. Si può misurare come deviazione angolare o come spostamento lineare lungo la linea d'azione. Esso si distingue inoltre in due componenti di cui si parlerà un po' più per esteso più avanti:
 - *Errori di costruzione*
 - *Errori generati dal carico*
- *Urti fra i denti.* Si verificano quando le deformazioni o gli errori di passo provocano un contatto prematuro con il dente che sta per entrare in presa. Il contatto avviene fuori dalla retta d'azione e può risultare una forza dinamica elevata che oltre ad elevare il livello della pressione sonora alla frequenza di ingranamento, può ridurre la vita dell'ingranaggio.
- *Forze dinamiche di ingranamento.* Sono il risultato delle variazioni di rigidità di ingranamento e degli errori di trasmissione. Queste forze, variabili nel corso della rotazione, attraverso i cuscinetti ed i supporti eccitano delle vibrazioni nella carcassa. Queste vibrazioni, se hanno frequenza uguale o prossima a quella di risonanza propria della carcassa, vengono amplificate e costituiscono una fonte importante di rumore.
- *Forze di attrito.* Come è noto, l'accoppiamento di due profili ad evolvente è un puro rotolamento solo in corrispondenza del diametro primitivo. Nelle zone sopra e sotto il diametro primitivo si ha uno strisciamento in direzione dell'altezza del dente, in un senso sopra e nel senso opposto sotto. Quando la direzione della forza d'attrito si inverte si, può innescare una vibrazione che è più evidente negli ingranaggi a denti dritti. Negli ingranaggi elicoidali, questo fenomeno è, in genere, trascurabile.
- *Air Pocketing (soffi d'aria).* E' il rumore generato dalla rapida compressione dell'aria provocata dai denti durante l'ingranamento. Per ingranaggi veloci, la velocità dell'aria si può avvicinare a quella del suono, provocando rumori di forte intensità alla frequenza di ingranamento.

- *Compressione del lubrificante.* Se i giochi tra i fianchi e sul fondo dente non sono sufficienti, il lubrificante può rimanere compresso tra i due ingranaggi. Quando viene espulso genera rumore, specie se colpisce le pareti della carcassa.

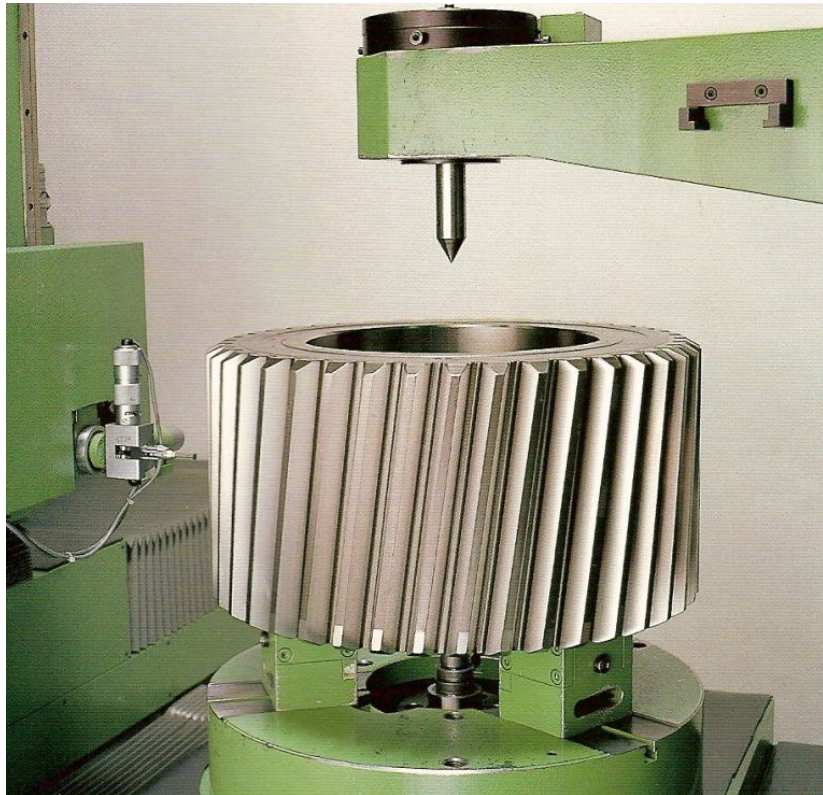


Figura N°3- *Controllo dei parametri geometrici di un ingranaggio cilindrico elicoidale*

Considerazioni sulla potenza trasmessa

In una certa misura il rumore generato da una trasmissione, per esempio un riduttore di grosse dimensioni, dipende dalla potenza trasmessa.

La potenza irradiata sotto forma di rumore, è accertato sperimentalmente, è di circa 10^{-9} della potenza trasmessa., questo a patto che il riduttore sia perfetto, cioè che sia progettato in modo corretto e che i denti siano opportunamente modificati per rendere minimo l'errore di trasmissione.

Si può definire l'efficienza acustica con:

$$\eta_{ac} = \frac{\text{potenza} \cdot \text{acustica}}{\text{potenza} \cdot \text{trasmessa}}$$

Quando si raddoppia la potenza trasmessa si ha un aumento di circa 3 dB del rumore.

Però la potenza si può aumentare o aumentando la velocità o aumentando la coppia.

Molti ricercatori sono concordi nel dire che un raddoppio della velocità aumenta il rumore di 5-7 dB (mediamente).

Bisogna però che la frequenza di ingranamento non coincida con la frequenza di risonanza del sistema o con la frequenza di antirisonanza. Nel primo caso si avrebbe un forte aumento della rumorosità, mentre nel secondo ci sarebbe una forte riduzione.

Il raddoppio della coppia fa crescere il livello sonoro di 3 dB (ma per alcuni ricercatori l'aumento può arrivare a 5-6 dB).

Si è detto che per effetto degli errori di costruzione e del carico, che il più delle volte è variabile, si hanno forti errori di ingranamento.

Questi errori possono essere attenuati con opportune modifiche del profilo e dell'elica, rendendo l'accoppiamento più silenzioso.

Nella seconda parte di questa trattazione entreremo più in dettaglio su questo argomento.

Considerazioni sugli ingranaggi ad alto rapporto di ricoprimento (HCR)

Solo poche parole per dire che, come oramai risulta evidente, con questo tipo di ingranaggi il carico sui singoli denti è molto più costante e quindi, complessivamente la trasmissione risulta più silenziosa.

Per ottenere l'allungamento della linea d'azione si può aumentare il diametro di fine evolvente, cioè aumentando il diametro esterno e diminuendo l'angolo di pressione normale. Se è possibile bisognerebbe ridurre anche il modulo.

Tutte queste modifiche del progetto dell'ingranaggio, se è vero che riducono il carico su ogni singolo dente, è anche vero che hanno qualche effetto negativo.

In primo luogo se il dente si allunga e si assottiglia, riduce la sua resistenza alla flessione.

Uno degli svantaggi degli ingranaggi ad evolvente è la rapida diminuzione del raggio di curvatura del profilo in prossimità del cerchio di base.

Così, la sollecitazione di contatto tra i denti in presa è inversamente proporzionale al raggio di curvatura e subisce un rapido incremento quando questo diventa piccolo

Non solo la sollecitazione di contatto aumenta a mano a mano che il punto di contatto si avvicina al cerchio di base, ma anche la velocità di strisciamento aumenta, aumentando il rischio di "scoring", che è funzione della pressione di contatto e della velocità di strisciamento.

Tutto ciò comporta un maggiore rischio per gli ingranaggi HCR che non per le dentature con dimensionamento normale.

Un'ultima osservazione: questi ingranaggi sono più sensibili agli errori di costruzione, e quindi le tolleranze di fabbricazione devono essere più strette.

(continua nella 2^a parte)