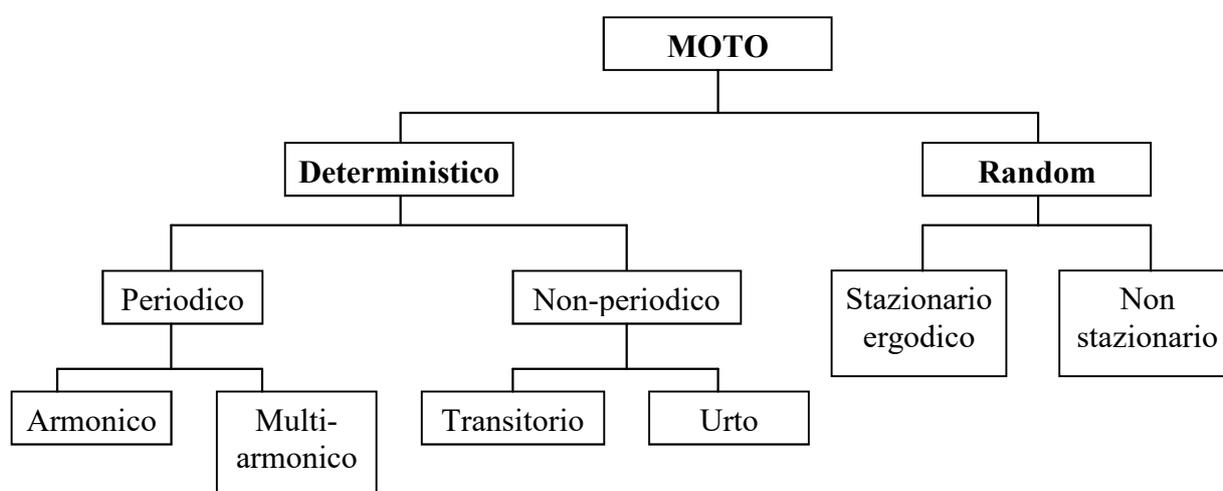


MISURA DELLE VIBRAZIONI

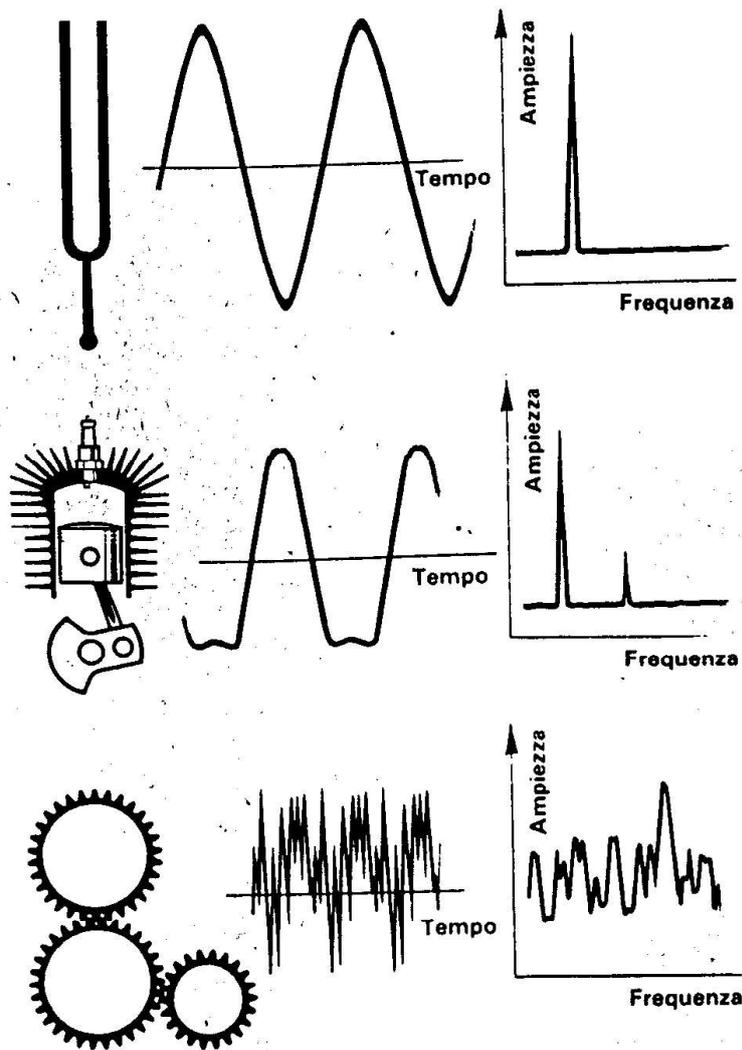
1. Introduzione

Un corpo vibra quando descrive intorno ad una posizione di riferimento un moto oscillatorio i cui parametri (ampiezza, valore medio, etc.) non sono in generale costanti nel tempo. La natura di una vibrazione può essere prevedibile a partire dalla conoscenza di precedenti ricorrenze, il fenomeno è in tal caso deterministico, o può essere caratterizzata dall'aver solamente alcune proprietà che seguono leggi statistiche, si parla in tal caso di moto stocastico o di vibrazioni random.



Tra i moti oscillatori deterministici periodici rientrano, ad esempio, le vibrazioni generate dalle macchine, in relazione alla tipologia, sono caratterizzate da componenti armoniche con pulsazioni multiple della velocità di rotazione degli alberi rotanti all'interno della macchina. Tra i moti random con caratteristiche stazionarie rientrano, ad esempio, il moto ondoso, il vento o la variazione altimetrica dovuta alle irregolarità dell'asfalto nei profili stradali. Tra i fenomeni non-periodici rientrano gli urti nelle varie forme o le vibrazioni che si manifestano nei transitori di avvio o di arresto delle macchine. Alle vibrazioni deterministiche si sovrappongono di solito delle vibrazioni casuali, che potranno essere considerate come disturbi (o *rumore*).

I segnali di vibrazione, deterministici o random, presentano solitamente molteplici componenti armoniche aventi differente frequenza e fase; la rappresentazione di una vibrazione nel dominio del tempo consente solo di stimare alcuni parametri di sintesi (picco, picco-picco, RMS, etc.) e l'analisi in frequenza si rende indispensabile per potere stimare il contributo fornito dalle singole armoniche.



Le misure di vibrazioni possono venire effettuate con modalità e scopi diversi:

- a) **misura del livello di vibrazione:** viene rilevato il livello di vibrazione di un sistema meccanico o il livello di vibrazione trasmesso al corpo umano, per confrontarlo con il valore ammesso da norme di sicurezza o di igiene del lavoro, o per valutare le sollecitazioni meccaniche indotte;
- b) **misura dell'eccitazione:** vengono misurate forze o momenti che possono costituire delle **forzanti**, cioè azioni che applicate ad un sistema in grado di vibrare lo pongono in vibrazione;
- c) **misura della risposta di un sistema ad un'eccitazione nota:** questo tipo di misura viene effettuata per identificare sperimentalmente funzione di risposta in frequenza di un corpo o un sistema di corpi e di stimarne le frequenze proprie e i modi propri di vibrare (Experimental Modal Analysis).

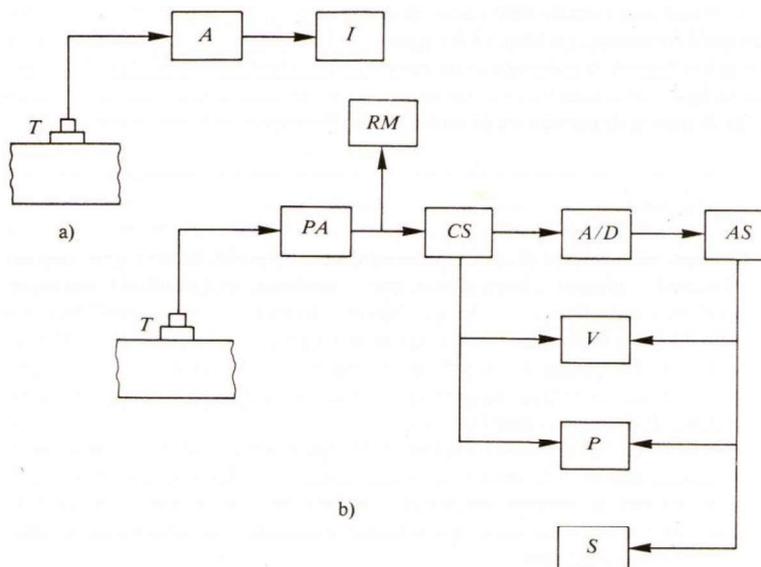
2. La catena di misura

Le misure di vibrazioni possono essere talvolta effettuate con strumenti abbastanza semplici, come i vibrometri a mano, ma usualmente richiedono una strumentazione relativamente complessa, che comprende almeno un *Trasduttore*, un *Amplificatore* e un *Indicatore*.

Il trasduttore è uno strumento sensibile allo spostamento, alla velocità o all'accelerazione, in grado di avere in uscita una tensione (o altra grandezza elettrica) proporzionale al valore istantaneo della grandezza in ingresso. La grandezza elettrica in uscita dal trasduttore viene prima amplificata e poi inviata ad uno strumento che ne indica il valore, o meglio, essendo opportunamente tarato, indica direttamente il valore della grandezza (spostamento, velocità, accelerazione) rilevata dal trasduttore.

Una *catena di misura* completa è solitamente costituita dai seguenti componenti:

- Trasduttore,
- Pre-Amplificatore,
- Condizionatore di Segnale,
- convertitore Analogico / Digitale,
- Analizzatore di Segnale,
- altri dispositivi (Visualizzatore, Stampante, Plotter...).



a) Catena di misura con trasduttore (T), amplificatore (A), indicatore (I).

b) Catena di misura completa, con trasduttore(T), pre-amplificatore (PA), condizionatore di segnale (CS), convertitore analogico-digitale (A/D), analizzatore di segnale (AS), registratore magnetico (RM), visualizzatore (V), plotter (P), stampante (S).

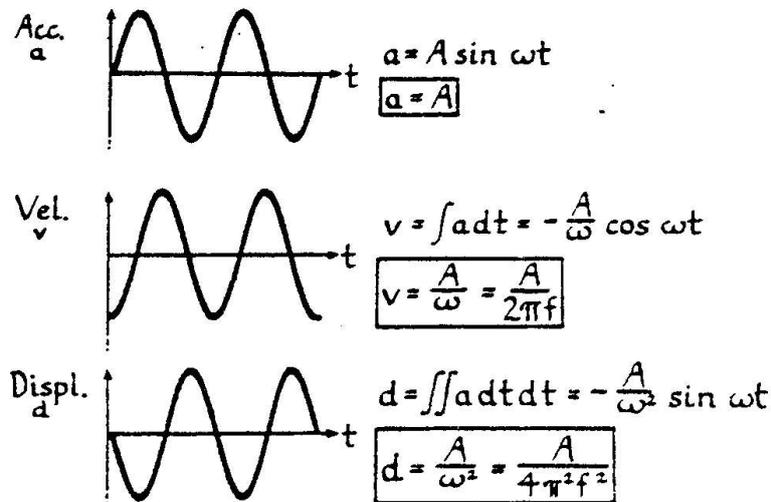
Il *segnale* (cioè la grandezza elettrica il cui valore è proporzionale a quello della grandezza rilevata) proveniente dal *trasduttore T* viene dapprima amplificato dal *pre-amplificatore PA*, e successivamente inviato ad un apparato CS, che lo tratta variamente, di solito amplificandolo ulteriormente e compiendo eventuali altre operazioni, come il filtraggio in frequenza o l'integrazione. Il filtraggio in frequenza può essere effettuato sia con filtri analogici (in cui il segnale in ingresso è continuo) sia con filtri digitali posti a valle del convertitore A/D e interni all'apparato AS. L'operazione di filtraggio in frequenza sul segnale in ingresso consente il passaggio solo di specifiche armoniche nel segnale in uscita. Un filtro passa-basso, ad esempio, permette il passaggio solo delle componenti a frequenza inferiore ad un valore imposto (frequenza di taglio del filtro). Un filtro passa-banda consente di filtrare tutte le armoniche al di fuori di una banda di frequenza assegnata. I filtri passa-banda analogici vengono utilizzati per effettuare l'analisi in frequenza in banda larga calcolando un parametro del segnale (di solito il valore RMS) per ciascuna banda in frequenza e fornendo la tipica rappresentazione del segnale attraverso istogrammi in banda d'ottava o 1/3 di banda d'ottava. L'analisi in frequenza in banda stretta (Fast Fourier Transform) viene effettuata a valle del convertitore A/D dopo che il segnale è stato quantizzato.

L'eventuale presenza aggiuntiva di un apparato integratore permette il passaggio dall'accelerazione alla velocità e/o dalla velocità allo spostamento.

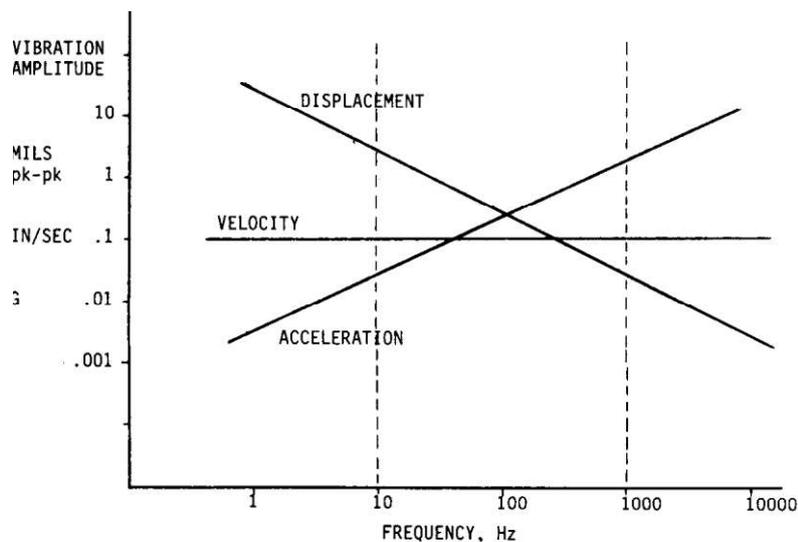
Il segnale condizionato viene di solito inviato ad un *convertitore analogico digitale A/D*, che ne esegue il campionamento ad una frequenza scelta dall'utente ($f_s=1/\Delta t$, sampling rate), rilevandone il valore numerico a intervalli regolari Δt di tempo. Il segnale proveniente dal trasduttore è un *segnale "analogico"* continuo, il cui andamento è analogo a quello della grandezza misurata; il *convertitore A/D* rileva il valore istantaneo del segnale a intervalli regolari di tempo, trasformandolo in un insieme discreto di numeri (*segnale "digitale"*) che possono essere gestiti ed elaborati da un calcolatore. Il segnale giunge infine *all'analizzatore di segnale AS*, il quale può operare sul segnale analogico mediante circuiti elettronici (filtri, derivatori, integratori); se invece il segnale è stato digitalizzato dal *convertitore A/D*, l'analizzatore è costituito da un calcolatore, che analizza il segnale campionato trattandolo come un insieme di dati numerici di ingresso, compiendo su di esso le più svariate operazioni matematiche.

3. Scelta della grandezza da misurare

Per stimare una vibrazione si può scegliere di misurare lo spostamento o le sue derivate prima e seconda, velocità e accelerazione. La scelta del parametro da misurare dipende dal range di frequenza del fenomeno. Con riferimento ad una singola armonica, qualunque sia il parametro considerato, rimangono inalterati forma e periodo della vibrazione, mentre si verifica una variazione di ampiezza e di fase. Quando si eseguono misure mediate nel tempo, si trascura la fase e le relazioni tra i tre parametri vengono stabilite unicamente dalla pulsazione $\omega=2\pi f$.



La seguente figura mostra un grafico della velocità ad andamento costante per tutto lo spettro di frequenze, con le corrispondenti curve di spostamento e accelerazione.

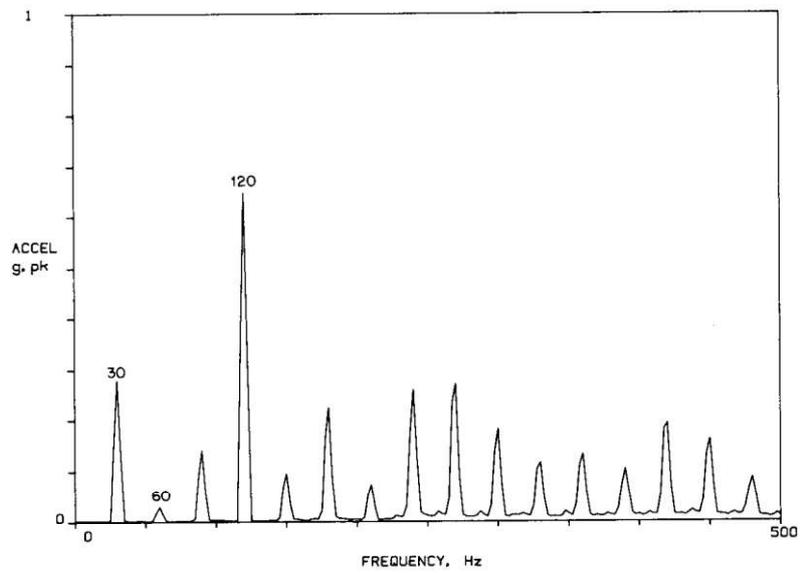
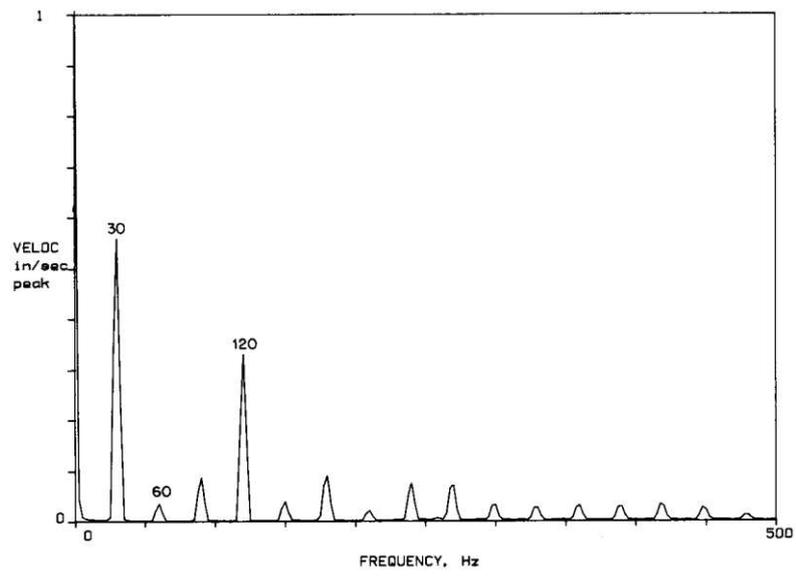
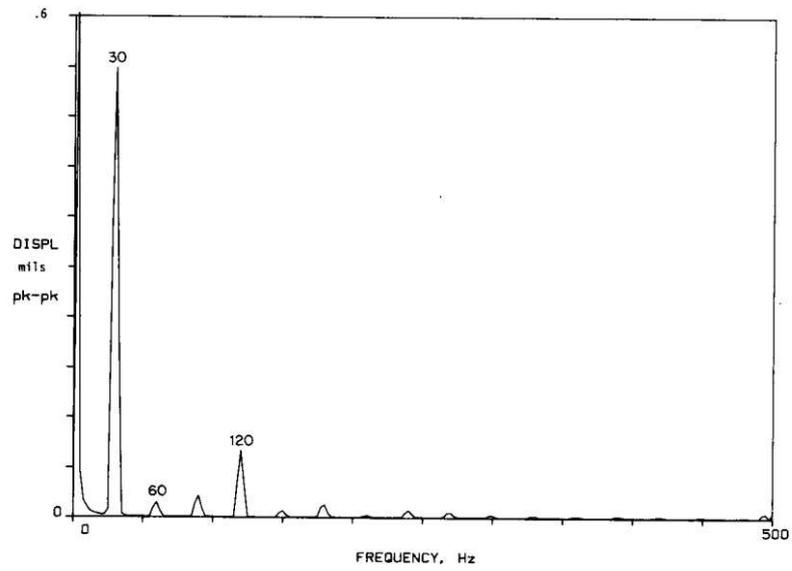


L'ampiezza di vibrazione in termini di spostamento accentua le componenti a bassa frequenza rispetto a quelle ad alta frequenza. Viceversa, l'accelerazione enfatizza le componenti ad alta frequenza. Le tre curve coprono un intervallo di frequenza da 1 a 1000 Hz, che coincide con il l'intervallo di interesse delle vibrazioni meccaniche.

Per misure a bassa frequenza (<1 Hz) conviene sempre rilevare spostamenti; mentre per misure ad alta frequenza (>100 Hz) conviene sempre rilevare accelerazioni.

Le normative ISO che valutano gli effetti delle vibrazioni sul corpo umano (ISO 2631-1 – Evaluation of human exposure to whole body vibration) o sul sistema mano-braccio (UNI EN ISO 5349-1 – Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano) impongono la misura dell'accelerazione come grandezza di riferimento per stimare la vibrazione, rispettivamente nel range 0.5-80 Hz nel caso del corpo intero (ad esclusione degli effetti legati al “mal di mare”) e nel range 8-1000 Hz per il sistema mano-braccio. In tutti i campi in cui la misura delle vibrazioni è effettuata in relazione agli effetti sul corpo umano la grandezza misurata è sempre l'accelerazione. La stima degli effetti delle vibrazioni sull'integrità strutturale degli edifici (UNI 9916:2004 – Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici) si basa invece sulla misura della velocità nell'intervallo di frequenza 1-250 Hz.

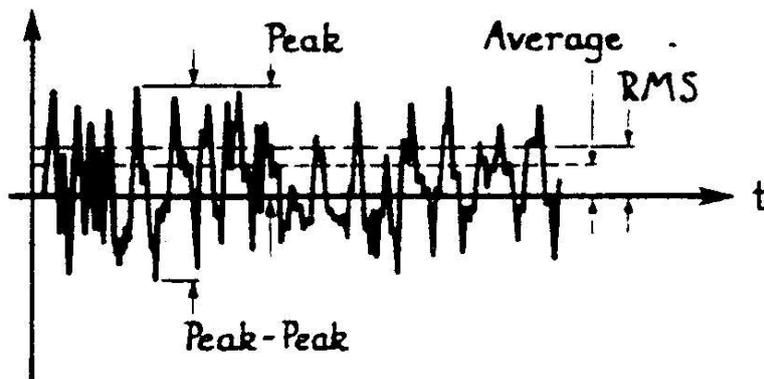
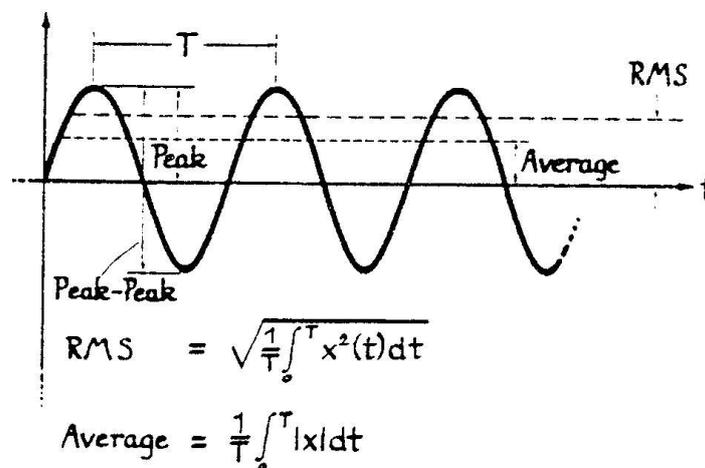
A titolo di esempio, nelle seguenti figure è mostrato lo spettro in frequenza dello stesso fenomeno vibratorio rappresentato rispettivamente in termini di spostamento, velocità e accelerazione. Si noti la variazione dell'ampiezza dei picchi a 30 e a 120 Hz; alcuni picchi sopra i 120 Hz, non visibili nel diagramma degli spostamenti, compaiono in quello delle accelerazioni. Il picco a 60 Hz ha approssimativamente la stessa ampiezza in tutti i diagrammi e può quindi essere assunto come riferimento nello spettro di frequenza.



4. Livelli di vibrazione nel dominio del tempo

L'analisi di un segnale di vibrazione espresso in termini di accelerazione nel dominio del tempo viene condotta calcolando diversi parametri di sintesi, che ne consentono la quantificazione del livello da confrontarsi con i livelli di riferimento eventualmente normati. Questi parametri sono:

- **picco-picco (peak-to-peak)**, indica l'escursione massima dell'onda (sollecitazione massima, gioco meccanico)
- **picco (peak)**, indica l'escursione massima positiva o negativa della vibrazione (urti di breve durata);



- **RMS (Root Mean Square = valore medio efficace)**, è la misura più significativa di ampiezza in quanto tiene conto della storia dell'onda nel tempo e dà un valore di ampiezza direttamente correlata al contenuto energetico della vibrazione:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

dove con $x(t)$ si è indicato l'andamento del segnale in funzione del tempo e T è la durata del segnale stesso. Nel caso di una grandezza sinusoidale di ampiezza A il suo valore efficace RMS vale:

$$RMS = \frac{A}{\sqrt{2}} \approx 0,707 A$$

Nel caso di segnali digitali costituiti da N campioni il valore RMS si valuta mediante la seguente espressione:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

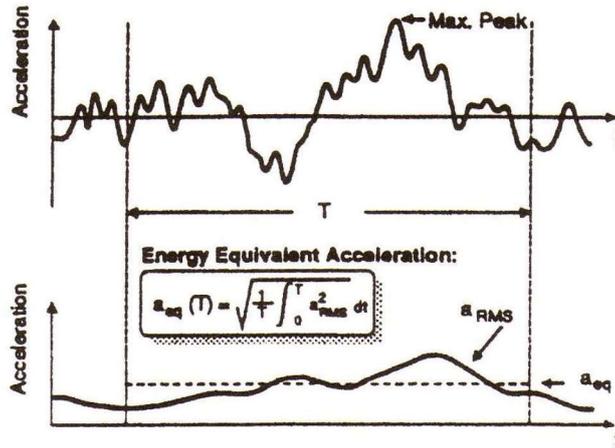
- **valore medio (Average)**, tiene conto della storia dell'onda nel tempo ma ha scarso interesse pratico non essendo correlato ad alcuna grandezza fisica:

$$Avg = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt} \quad \text{per segnali continui}$$

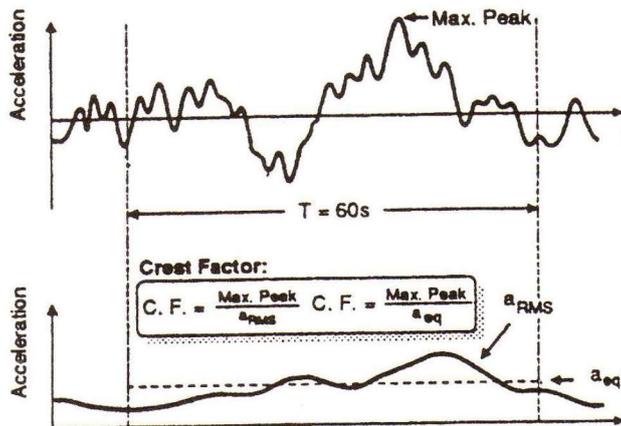
$$Avg = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{per segnali discreti}$$

Con esplicito riferimento alle misure di accelerazione, la durata T della misura viene suddivisa solitamente in intervalli T_i per ciascuno dei quali viene calcolato il corrispondente valore RMS. La base di misura per il calcolo del valore di RMS in media mobile è solitamente di 1 s. In tal modo è possibile plottare l'andamento del valore RMS nel tempo e verificarne la correlazione con eventuali picchi locali di ampiezza. Si definisce **a_{eq} , l'accelerazione equivalente all'energia della vibrazione**, la media lineare del valore efficace calcolata in un intervallo di tempo T :

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{RMS}^2(t) dt}$$



Il **fattore di cresta** viene definito come il rapporto tra il valore di picco e il valore RMS o il rapporto tra il valore di picco e il valore di a_{eq} . Fenomeni a carattere impulsivo (urti) presenteranno fattori di cresta rilevanti e il picco massimo o il valore picco-picco saranno gli indici maggiormente correlati al disturbo.



I *livelli di vibrazione* possono essere espressi, oltre che in unità metriche, in grandezze logaritmiche; la scala impiegata è quella del *decibel* (dB). Esso è dato dal logaritmo del rapporto tra il livello efficace quadrato misurato ed un livello di riferimento standard, pertanto è una grandezza adimensionale:

$$dB = 10 \text{Log} \left(\frac{x^2}{x_{rif}^2} \right) = 20 \text{Log} \left(\frac{x}{x_{rif}} \right)$$

x = livello efficace misurato;

x_{rif} = livello di riferimento.

In tabella sono riportati i livelli di riferimento per i parametri accelerazione, velocità e forza, secondo lo standard ISO/DIS 1683-2.

Grandezza	Definizione	Livelli di riferimento ISO
Livello accelerazione vibrazione	$L_a = 20 \log_{10}(a/a_0) \text{ dB}$	$a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$
Livello velocità vibrazione	$L_v = 20 \log_{10}(v/v_0) \text{ dB}$	$v_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$
Livello vibrazione di forze	$L_F = 20 \log_{10}(F/F_0) \text{ dB}$	$F_0 = 10^{-6} \text{ N}$

L'impiego di scale logaritmiche per la rappresentazione delle vibrazioni è molto diffuso nella pratica di misura se il segnale è espresso in banda larga (banda d'ottava o 1/3 di banda d'ottava), in particolare se occorre applicare particolari filtri di pesatura in frequenza come quelli imposti dalle normative ISO 2631 e 5349. Uno dei vantaggi offerti è quello di poter comprimere entro una scala ragionevolmente ridotta una gamma di valori molto estesa; si sortisce, infatti, l'effetto di dilatare sul grafico le frequenze o i valori di ampiezza più bassi e di comprimere quelli più elevati, dando così la stessa percentuale di risoluzione sull'intero grafico, pur mantenendo le dimensioni entro limiti ragionevoli.