

| | |
|--|----|
| Introduzione alla manutenzione..... | 1 |
| La pianificazione della manutenzione | 2 |
| Analisi delle vibrazioni | 3 |
| Le caratteristiche dello stato di salute di una macchina | 3 |
| La scelta del trasduttore | 8 |
| Schemi di montaggio dei trasduttori | 11 |
| Valutazione dello stato di una macchina..... | 15 |
| Analisi dei difetti superficiali e interni | 18 |
| Correnti indotte | 19 |
| Emissione acustica | 20 |
| Liquidi penetranti | 21 |
| Magnetoscopia..... | 22 |
| Metodi ottici | 23 |
| Radiografia | 24 |
| Rilevazione di fughe | 24 |
| Termografia..... | 26 |
| Ultrasuoni..... | 27 |

| | |
|---|----|
| Analisi degli oli per la rilevazione preventiva dell'usura in macchine rotanti..... | 28 |
| La ferrografia | 29 |
| Lo strumento a lettura diretta..... | 30 |
| L'analizzatore..... | 32 |
| Il ferroscoPIO..... | 33 |
| Applicazione e affidabilità delle prove non distruttive (PnD) | 34 |
| Anomalie più frequenti negli impianti industriali e risoluzione | 37 |
| Deformazione..... | 37 |
| Blistering..... | 37 |
| Surriscaldamenti..... | 37 |
| Corrosione o erosione uniforme | 38 |
| Corrosione localizzata | 38 |
| Superfici a contatto con selle e sostegni vari..... | 39 |
| Superfici a contatto con diaframmi | 39 |
| Anomalie dei rivestimenti refrattari..... | 39 |
| Anomalie delle coibentazioni..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Anomalie di rivestimenti non conduttori..... | 40 |
| Anomalie di rivestimenti conduttori e placcature | 40 |
| Cricche di varia natura | 41 |
| Depositi interni in tubazioni..... | 41 |
| Attacco da idrogeno..... | 42 |
| Processi di carburazione | 42 |
| Difetti in saldatura | 42 |
| Esami globali dell'impianto o del componente | 42 |
| Prova di tenuta o ricerca di fughe | 43 |
| Emissione acustica | 43 |
| Termografia all'infrarosso | 43 |
| Case study | 44 |
| Harley Davidson | 44 |
| Monitoraggio delle condizioni delle piattaforme di perforazione | 45 |
| Analisi delle vibrazioni su un riduttore epicicloidale | 46 |
| Caso studio sulla termografia | 49 |
| Ottimizzazione delle condizioni del lubrificante | 49 |
| Analisi di cuscinetti | 52 |
| Analisi di motori elettrici generici da 450 HP | 54 |

| | |
|---------------------------------|----|
| Conclusioni..... | 56 |
| Bibliografia e sitografia | 57 |

Introduzione alla manutenzione

In un contesto in cui le aziende sono sempre più competitive tra di loro e in cui la qualità e le unità prodotte sono fondamentali, parlare di manutenzione è sempre più importante perché è finalizzata a massimizzare il livello di utilizzabilità e di efficienza dei macchinari. La manutenzione, quindi, non è solo composta da una serie di azioni volte alla riparazione del macchinario, ma comprende anche un'efficiente organizzazione da parte dello staff allo scopo di minimizzare i tempi di diagnosi, ridurre il numero di guasti casuali per fermare il meno possibile la produzione, assicurare la massima efficienza per il periodo più lungo possibile e programmare tutte le interruzioni della produzione allo scopo di minimizzare gli imprevisti. La norma tecnica CEI 56-50, 1997 (UNI 10147 del 1/10/2003) definisce il termine manutenzione: *“la Manutenzione, è la combinazione di tutte le azioni tecniche e amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o riportare un'entità in uno stato in cui possa svolgere la funzione richiesta”*.

Le tipologie di manutenzione sono:

- La manutenzione autonoma che comprende un insieme di azioni atte a determinare e giudicare il funzionamento di un'unità per determinare le cause di usura e poter intervenire in modo da limitare gli interventi nel tempo
- La manutenzione preventiva per rallentare il degrado del funzionamento di un macchinario
- La manutenzione programmata si realizza dopo un determinato numero di ore di funzionamento o di pezzi prodotti, viene interrotta la produzione e si procede alla manutenzione
- La manutenzione a guasto consiste in tutte le attività finalizzate al ripristino delle condizioni di funzionamento dopo un guasto

- La manutenzione migliorativa per consentire il mantenimento delle prestazioni previste in sede di progetto

Seguendo un minuzioso programma di manutenzione si avrà una gestione economica ed efficiente dell'impianto con conseguenti miglioramenti della produttività. A tal proposito è quindi di fondamentale importanza formare il personale in modo che sia agevolato l'intervento in caso di problemi o che venga eseguita una manutenzione perfetta.

La pianificazione della manutenzione

La pianificazione è l'insieme coordinato di piani, programmi e lavori che deve avere obiettivi precisi e realizzabili e deve contenere l'indicazione delle azioni necessarie a realizzarli, deve essere il risultato della considerazione di tutte le attività gestionali e deve essere articolato su vari livelli temporanei. Il punto di partenza della pianificazione è il "Maintenance Pattern" che stabilisce la durata e la frequenza delle fermate programmate di ciascun impianto e delinea il dimensionamento e l'allocazione delle risorse necessarie per eseguire i lavori. Il piano di manutenzione è l'ottimizzazione, coerente con il piano di produzione, delle principali attività di manutenzione. Una corretta formulazione del piano di manutenzione consente di ottenere un flusso produttivo il più lineare possibile. Per questo motivo i piani di manutenzione devono essere affidabili, rendere compatibili le attività di manutenzione con quelle di produzione e ottimizzare i tempi produttivi, il flusso produttivo e i consumi di energia oltre che le ore di manutenzione programmata. I piani di manutenzione si differenziano tra di loro per l'arco di tempo in cui si sviluppano e per il diverso livello di dettaglio dei contenuti, abbiamo piani pluriennale, annuale, trimestrale e mensile. I contenuti dei piani derivano

dall'elenco dei lavori, dallo schema delle fermate e dalla stima dell'entità dei guasti accidentali ipotizzabili. L'elenco dei lavori principali è l'insieme dei principali lavori su ciascun impianto, contiene la descrizione concisa dei lavori principali, il periodo in cui si devono eseguire i lavori e la loro durata, l'indicazione per ogni lavoro dei materiali necessari non previsti a scorta. In questo modo l'elenco dei lavori aiuta a definire i programmi di produzione attraverso l'individuazione e pianificazione dei grossi lavori che richiedono lunghe fermate degli impianti, il piano acquisti materiali e il budget di manutenzione. Lo schema delle fermate annuali e periodiche rappresenta la pianificazione in termini di durata, frequenza e collocazione nel tempo sia delle grandi fermate annuali che di quelle periodiche di routine. La stima delle entità dei guasti ipotizzabili è una stima su base statistica. Consente di valutare il tempo disponibile per l'esercizio dell'impianto. A suggerire lo schema delle fermate annuali è l'elenco dei lavori principali e periodici .

Analisi delle vibrazioni

Le caratteristiche dello stato di salute di una macchina

La temperatura è prevalentemente un indicatore della condizione di funzionamento della macchina; ad esempio la temperatura di parete di un carter di un riduttore a ingranaggi può segnalare difetti di lubrificazione o il suo stato meccanico, la temperatura della carcassa di una pompa può indicare cavitazione o danneggiamento degli anelli di usura, la temperatura di un cuscinetto a rotolamento può evidenziare difetti di lubrificazione o il suo stato meccanico.

La pressione può a volte essere un indicatore dello stato di salute. Una insufficiente pressione di mandata di un compressore alternativo può indicare usura delle fasce

elastiche o mancanza di tenuta delle valvole. Una bassa pressione differenziale fra gli estremi del tamburo equilibratore di una turbina o di un compressore rotativo può indicare giochi eccessivi nelle tenute. Un'elevata pressione differenziale fra gli estremi di una turbina invece segnala incrostazioni e riduzione dei vani di passaggio, con possibile sovraccarico del reggispinta.

La posizione è uno degli indicatori sia delle dilatazioni termiche che dell'usura: la posizione radiale di un albero su bronzine può essere un segnale di allarme di perdita di materiale per usura o per scariche elettriche e di contatto tra parti fisse e mobili, la posizione dello stelo di un pistone di un motore può indicare usura del testacroce, delle fasce elastiche e del cilindro, infine, la posizione assiale relativa fra rotore e statore può essere segnale di dilatazioni termiche eccessive o cedimento o usura del reggispinta.

La vibrazione è però l'indicatore che meglio caratterizza lo stato di salute di una macchina. Sia la misurazione della vibrazione globale che un'analisi più approfondita del segnale permettono di individuare i difetti. I due difetti più comuni da individuare tramite le vibrazioni sono lo sbilanciamento e il disallineamento. Il primo genera una vibrazione principalmente radiale. Il disallineamento invece produce una vibrazione sia radiale che assiale. Elevati disallineamenti possono generare il fenomeno dell'instabilità subsincrona per effetto della diminuzione del carico sul cuscinetto lubrificato, questa instabilità può essere indice indiretto del disallineamento e del suo verso. Spettri contenenti, oltre alle frequenze dell'albero, le varie armoniche superiori della velocità dell'albero possono prodursi per eventi che si ripetono quotidianamente (rotolamento delle sfere o dei rulli sulle piste di un cuscinetto volvente, contatto fra i denti di ruote dentate, passaggio delle palette di

una palettatura in corrispondenza di un getto), per distorsione del segnale e per non linearità (giochi dovuti ad allentamento di bulloni, strisciamento).

Nel caso di un albero incrinato si riscontra soprattutto un aumento della vibrazione in corrispondenza della frequenza di rotazione e della seconda armonica. Le vibrazioni torsionali evidenziano perfettamente la formazione di cricche. Frequenze armoniche della frequenza di rete sono indicatori di problemi di origine elettrica.

Lo sbilanciamento può essere generato da pessima equilibratura, da inflessione dell'albero per dilatazioni termiche, da deformazione del rotore per forze magnetiche. Questo genera una componente radiale alla velocità d'albero e una assiale alla frequenza. Consideriamo due sopporti agli estremi opposti di un albero, le componenti assiali alla velocità d'albero sono in fase, notiamo che se la misura di fase è effettuata con un analizzatore monocanale, cioè tramite acquisizioni non simultanee, si rischia di incorrere in problemi perché la velocità del rotore potrebbe essere cambiata. Occorre quindi più di un canale, cioè si devono effettuare due misure valutando le fasi dei segnali rispetto a un riferimento (keyphasor) sull'asse, che può consistere in una cava sull'albero o una striscia di nastro adesivo riflettente. Il disallineamento può essere prodotto da assestamento delle fondazioni, da dilatazioni termiche, da spinte trasmesse dalle tubazioni. Il livello delle vibrazioni non dipende dall'entità del disallineamento ma dall'attitudine ad assorbirlo, varia quindi con la velocità dell'albero, con il momento trasmesso e con qualsiasi causa che generi una variazione della rigidità dell'accoppiamento. Il disallineamento genera una componente radiale al doppio della velocità dell'albero e una assiale alla velocità d'albero.

L'instabilità subsincrona è tipica dei rotor su cuscinetti lubrificati e genera una vibrazione radiale a una frequenza compresa fra il 30 e il 50% della frequenza di

rotazione dell'albero. È dovuta a un moto vorticoso de lubrificante nel cuscinetto, a variazioni del gioco fra albero e bronzina, a contatti albero-bronzina e genera un moto di precessione nella traiettoria del perno. È rilevabile mediante l'analisi in frequenza o la visualizzazione dell'orbita del perno. Il segnale rilevato è nel dominio del tempo ed è solitamente piccolo, modulato in ampiezza, riconoscibile nel dominio delle frequenze per le bande laterali.

Considerando il vortice d'olio, la frequenza dell'instabilità subsincrona è circa il 48% della frequenza di rotazione dell'albero. Le cause dell'instabilità risiedono nel disallineamento o in una cattiva progettazione del cuscinetto, può quindi essere ridotta variando il carico o riducendo la velocità di rotazione della macchina. Se deriva da una cattiva progettazione si può anche tentare ad introdurre un disallineamento che aumenti il carico sul cuscinetto instabile.

Gli accoppiamenti laschi producono non linearità e quindi picchi alla frequenza d'albero e alle sue armoniche.

Gli sfregamenti producono componenti ad alta frequenza, le forme d'onda nel dominio del tempo possono presentare degli appiattimenti.

Le vibrazioni di origine elettromagnetica sono molto importanti per le macchine elettriche. Sono riconoscibili perché disalimentando la macchina i fenomeni elettromagnetici scompaiono subito a differenza di quelli meccanici che scompaiono al diminuire dei giri. Il campo magnetico rotante genera forze alternate, si verifica quindi una vibrazione a p volte la frequenza di rete, dove p è il numero di poli, detta frequenza di passaggio dei poli. Questa forza è proporzionale al quadrato della corrente, quindi la vibrazione dipende solamente dal carico. Se consideriamo macchine asincrone a due poli, la frequenza di rotazione e quella di rete sono molto vicine quindi si verificano dei battimenti. Per effetto delle eccitazioni qualche parte

della macchina può entrare in risonanza, se riguarda la palettatura a la girante, il problema è molto grave e può portare a rottura, se riguarda tubazioni, pannelli portastrumenti, ecc si può ovviare il problema agevolmente ad esempio con irrigidimenti.

Le turbomacchine centrifughe (turbine, pompe, compressori, soffianti, ventilatori) generano componenti alla frequenza d'albero (sbilanciamento), al doppio della frequenza d'albero (disallineamento), ad armoniche della frequenza d'albero (accoppiamenti laschi), alla frequenza d'albero per il numero dei vani fra le pareti (VPF), ad armoniche delle VPF.

Le macchine idrauliche presentano spettri semplici e che risentono poco delle condizioni di funzionamento, al contrario delle macchine a gas che presentano spettri più complessi e risentono molto delle condizioni di funzionamento.

Le turbomacchine assiali (turbine, compressori, soffianti, ventilatori) generano componenti alla frequenza d'albero (sbilanciamento), al doppio della frequenza d'albero (disallineamento), ad armoniche della frequenza d'albero (accoppiamenti laschi), alla frequenza d'albero moltiplicata per il numero di palette teorico (BPF), ad armoniche della BPF, a frequenze somma e differenza delle BPF e delle loro armoniche con la frequenza d'albero.

Le macchine alternative (motori, pompe, compressori) danno origine a spettri molto complessi, per il numero rilevante di organi in moto, con componenti alla frequenza d'albero, al doppio della frequenza d'albero, alle armoniche della frequenza d'albero, alle frequenze corrispondenti a fenomeni ripetitivi come l'apertura e chiusura delle valvole.

Nei riduttori ad ingranaggi si originano componenti alla frequenza di imbocco dei denti (GMF), a frequenze armoniche della GMF, alla frequenza di coincidenza cioè

quella per cui un difetto di un dente incontra un difetto del dente dell'altra ruota. La frequenza di coincidenza è molto bassa, ma si trova a frequenze più alte sotto forma di bande laterali della GMF per effetto della modulazione che si produce.

I cuscinetti a rotolamento sono la causa più comune di avaria delle macchine piccole. I difetti locali di un elemento di un cuscinetto volvente causano una serie di impulsi ad una cadenza che dipende dalla localizzazione del difetto. Le tecniche di monitoraggio dei cuscinetti sono di vario tipo. Prima di tutto ci sono le misure di impulsività come il fattore di cresta e la kurtosis. Il primo è più semplice da calcolare ma non presenta la stessa ripetitività della kurtosis. Entrambi però sono indipendenti dal livello del segnale ma i valori rilevati su un cuscinetto rispettivamente in ottime e in pessime condizioni non sono molto diversi e quindi l'informazione va estratta effettuando un'analisi di tendenza. Il fattore di cresta si calcola solitamente in accelerazione per evidenziare i componenti ad alta frequenza e si effettua un filtraggio per eliminare la vibrazione di fondo. La kurtosis pesa molto gli impatti rispetto al valore RMS e può essere calcolata per bande di frequenza separate per eliminare la vibrazione di fondo.

La scelta del trasduttore

Il monitoraggio delle vibrazioni delle macchine è di fondamentale importanza e parte dalla scelta del trasduttore più adatto. La scelta del tipo di trasduttore dipende da quale parte di macchina, albero o carcassa, fornisce le migliori informazioni; le più frequenti sono quelle all'albero (squilibri, disallineamenti, spinte assiali, sfregamenti) ma non mancano casi in cui bisogna considerare la carcassa (risonanza, cedimento di supporti, deformazione termica), quando invece è necessario

considerare sia il moto assoluto che quello dell'albero-carcassa si usano traduttori doppi.

Le tecniche della risonanza del trasduttore non analizzano la vibrazione della macchina per isolare componenti ad alta frequenza eccitati dagli impatti, ma impiegano un trasduttore progettato per entrare in risonanza. Un filtro passa banda è impostato in modo da lasciar passare solo una stretta banda di frequenze centrata sulla risonanza del trasduttore. Si misura solo la parte del segnale filtrato che eccede una certa soglia. L'ampiezza della risposta del trasduttore ha un impatto di data entità ed è costante, quindi con lo Shock Pulse Method che impiega un trasduttore risonante a 30÷35 kHz, è possibile valutare l'entità del danno usando dati empirici di prove sperimentali. Il metodo della Spike Energy impiega un trasduttore risonante a 25÷35 kHz e ricava un numero SE combinando valore di picco dell'accelerazione, valore efficace, frequenza delle onde d'urto causate dai difetti, basandosi sull'osservazione che l'usura del cuscinetto è caratterizzata da un aumento in ampiezza e da una diminuzione della frequenza.

Il metodo della rilevazione acustica del difetto incipiente (IFD) impiega un trasduttore risonante a 80÷120 kHz. Il segnale viene condizionato in modo da fornire tre valori: il valore efficace che indica lo stato generale del cuscinetto, la frequenza con cui il segnale supera una prefissata soglia che indica il numero dei difetti, l'energia dei picchi aventi ampiezza 2÷4 volte il valore efficace che indica la gravità dei difetti.

L'SPM e la IFD funzionano bene nel caso di motori o altre apparecchiature silenziose, ma non dimostrano la stessa efficacia nelle pompe dove il flusso e la cavitazione producono impatti che interferiscono con gli impulsi prodotti dai difetti dei cuscinetti volventi.

Il metodo SEE usa lo stesso tipo di condizionamento del segnale del metodo dell'involuppo spettrale, ma lavora in un intervallo diverso frequenze. Il segnale captato da uno specifico sensore è di tipo acustico. Il crescere di una microcricca provoca la rottura del film di lubrificante e un contatto metallo-metallo che genera frequenze anche a 300 kHz, un componente di tale frequenza segnala quindi un difetto.

I trasduttori di vibrazioni sono di diversi tipi. I trasduttori di prossimità si usano su tutte le turbomacchine perché la flessibilità dei loro cuscinetti e le strutture pesando generano la trasmissione di una risposta esterna debole. Le sonde di prossimità misurano lo spostamento relativo, solitamente il moto del perno dell'albero rispetto al cuscinetto e siccome la risposta in frequenza varia tra gli 0 Hz e i 10 kHz misurano sia la posizione statica che quella dinamica.

I velocimetri sono trasduttori sismici, il loro funzionamento è dovuto ad un magnete immerso in un liquido smorzante e vincolato a muoversi all'interno di una bobina generandovi un segnale. Affinché misuri la velocità del supporto bisogna lavorare a frequenze maggiori della frequenza naturale.

L'introduzione di trasduttori e di strumenti atti al monitoraggio delle condizioni delle macchine e dei componenti meccanici è standard, cioè devono essere seguiti degli schemi di montaggio ben precisi.

Schemi di montaggio dei trasduttori

Nei cuscinetti radiale lubrificati sono previsti dei sensori di prossimità ortogonali (rilevano la posizione radiale dell'albero e permettono la visualizzazione dell'orbita del perno), un sensore di prossimità che funge da keyphasor (utilizzato per un segnale tachimetrico e per un riferimento di fase relativo alla posizione angolare dell'albero), un sensore di prossimità per misurare gli spostamenti assiali e una termoresistenza che misura la temperatura nella zona di

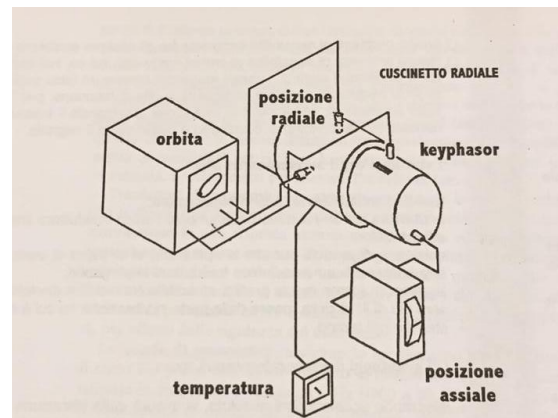


Figura 1 Disposizione dei sensori nei cuscinetti radiali

massimo carico del cuscinetto. A parità di velocità e di carico della macchina la posizione radiale dell'albero indica lo stato di usura del cuscinetto, mentre le vibrazioni sono legate allo stato di salute dell'intera macchina.

Invece la disposizione dei cuscinetti assiali lubrificati prevede due sensori di prossimità ortogonali, un sensore di prossimità usato come keyphasor, due sensori di prossimità che misurano lo spostamento assiale del collare di spinta, un terzo sensore di prossimità che rileva eventuali rotture del collare di spina e una termoresistenza che dà un feedback sulla spinta assiale.

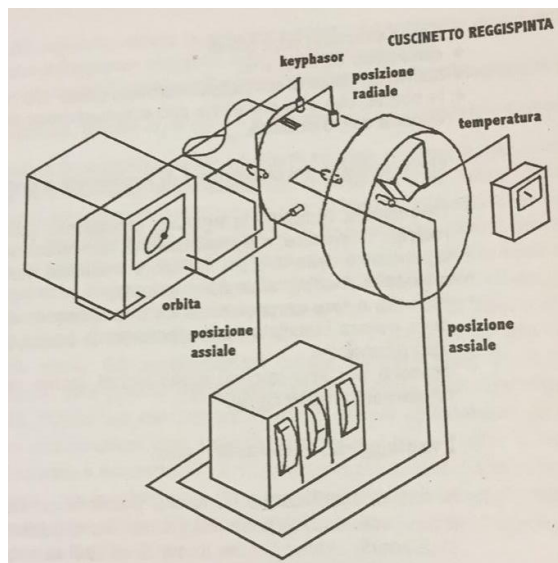


Figura 2 Disposizione dei sensori nei cuscinetti reggispinta

Nelle turbine è fondamentale evitare contatti nei cuscinetti di spinta il controllo della posizione assiale è fondamentale, quindi gli spostamenti assiali devono essere piccoli e il loro controllo è fondamentale. Il controllo dell'essere effettuato continuamente perché la variazione della posizione assiale può essere rapida e improvvisa. Anche nelle macchine in cui ci sono parti in moto relativo che devono essere vicine tra di loro è importante tenere sotto osservazione la distanza tramite la rilevazione degli spostamenti differenziali; ad esempio nelle turbine il rotore e la casa sono progettati in modo che un'estremità si libera di dilatarsi rispetto ad un'altra, le dilatazioni in esame sono diverse a seconda delle fasi di funzionamento. Le turbine a vapore solitamente consistono in uno stadio ad alta, uno a media e uno a bassa pressione, i rotori sono collegati tra di loro e il complesso della turbina è collegato ad un generatore, in questo contesto è quindi fondamentale misurare le vibrazioni e la posizione assiale. Per fare ciò si utilizzano coppie di trasduttori di prossimità disposti ortogonalmente in corrispondenza di ogni cuscinetto radiale della turbina e del generatore. Il segnale corrispondente al sensore sismico non deve per forza essere monitorato continuamente ma viene usato quando ce ne è bisogno quindi nella fase di avviamento, nei cambiamenti di carico e nel bilanciamento. Si può inoltre rivelare utile installare altri trasduttori da utilizzare solo in caso di necessità. In corrispondenza di eventuali cambiamenti di diametro vengono disposti dei sensori sul collare di spinta per controllare la posizione assiale. Per ricevere feedback riguardo precarichi, erosione elettrostatica e altri disturbi possiamo usare i sensori che misurano la vibrazione radiale grazie ai quali ricaviamo la posizione media dell'albero rispetto al cuscinetto. Il keyphasor fornisce un segnale ogni giro e quindi ci dà un'informazione angolare di fase e permette di ricavare velocità e accelerazione. Andrebbero anche installati minimo due sensori per ogni cuscinetto

radiale e su ogni lato del cuscinetto di spinta e andrebbe anche introdotto un accelerometro per misurare vibrazioni ad alta frequenza prodotte dalle palettature. Le turbine a gas grandi e medie sono composte invece da cuscinetti a lubrificazione fluida e la struttura di supporto è relativamente flessibile, per questo motivo si usano sensori doppi nei cuscinetti e un accelerometro aggiuntivo viene usato per le vibrazioni ad alta frequenza prodotte dalle palettature. Bisogna inoltre considerare che queste turbine prevedono procedure di avviamento secondo sequenze legate alla velocità di rotazione e quindi si rende necessario l'utilizzo di un keyphasor, se le turbine sono a doppio albero si installerà un keyphasor sull'albero e uno sull'asse della turbina. Come sempre ci saranno anche dei sensori di temperatura per i cuscinetti, l'olio, la temperatura ambiente.

Le turbine Pelton sono caratterizzate da velocità elevate e da un basso rapporto fra la massa dello statore e del rotore, il monitoraggio è incentrato sulle vibrazioni statoriche con un occhio di riguardo al bilanciamento.

Nei compressori centrifughi di processo si hanno solitamente cuscinetti a lubrificazione fluida e un rapporto elevato tra la massa statorica e quella rotorica, ciò comporta l'utilizzo di sensori di prossimità radiali ad ogni cuscinetto e almeno un trasduttore assiale nel cuscinetto reggispinna. Talvolta il keyphasor è premontato sul motore, se c'è un riduttore ad ingranaggi invece il keyphasor andrà montato sul compressore.

I gruppi compressori centrifughi sono costituiti da un determinato numero di unità centrifughe che prendono il moto con il loro pignone, da una ruota dentata centrale azionata da un motore o da una turbina. Un esempio di questo impianto sono gli impianti per aria compressa, in questi impianti la ruota centrale ha una velocità massima di 3600 rpm e pignoni di 60000 rpm, sono macchine più piccole rispetto ai

compressori centrifughi e si usano uno o due sensori di prossimità per pignone e, a volte, un sensore di prossimità sull'albero della ruota assieme a dei keyphasor sugli alberi.

Nei compressori alternativi vengono montati i sensori di prossimità sui cuscinetti, un keyphasor (che fornisce un impulso quando un pistone è al punto morto superiore) e dei traduttori di prossimità per monitorare il pistone; si ottengono così informazioni sul disallineamento e usura e dal segnale dinamico del movimento veniamo a conoscenza delle vibrazioni e delle inflessioni della biella.

I grandi ventilatori prevedono l'utilizzo di cuscinetti a lubrificazione fluida, la curvatura dell'albero è da monitorare perché a causa di effetti meccanici e termici può aumentare e generare problemi di fondazioni. Si adottano quindi sensori doppi o, se si vuole risparmiare, si installano sulla struttura di supporto trasduttori di velocità e dei Dual Path Monitors. È fondamentale però non dimenticarsi di montare dei sensori di prossimità installati permanentemente per il bilanciamento.

Le pompe vanno suddivise in grandi pompe e piccole pompe, in generale però il rapporto fra le masse statoriche e quelle rotoriche cresce con la prevalenza: pompe ad alta prevalenza hanno una carcassa rigida e pesante e un motore flessibile e leggero; il contrario per le pompe a bassa prevalenza. Nelle grandi pompe i cuscinetti sono a lubrificazione fluida quindi, come al solito, useremo un trasduttore di prossimità in ogni cuscinetto, un trasduttore di prossimità e direzione assiale, un keyphasor e dei sensori di temperatura. Il discorso è differente per le piccole pompe che non sono componenti critici e usano cuscinetti volventi, bastano quindi misure periodiche con traduttori montati sulla struttura di supporto.

Anche i grandi riduttori e i moltiplicatori a ingranaggi adottano cuscinetti a lubrificazione fluida, quindi si utilizzano traduttori di prossimità XY in

corrispondenza di ogni cuscinetto. Se però si ha il bisogno di fare economia i traduttori devono comunque essere installati permanentemente ma si limiterà il monitoraggio continuo ai soli cuscinetti posti rispettivamente all'estremo di ingresso e di uscita dell'albero di ingresso e uscita, è buona norma montare almeno un sensore assiale su ogni albero. Se però le ruote sono a denti elicoidali bisogna tenere in considerazione il montaggio di un sensore assiale, in quanto in questa direzione l'ingranaggio genera una spinta che si "scarica" su un cuscinetto reggispinga. Nel caso invece di ingranaggi bielcoidali la spinta assiale si trascura, ma bisogna tenere a mente che accoppiamenti troppo rigidi o addirittura bloccati possono spostare assialmente uno degli alberi causando seri danni al cuscinetto di spinta. A ciò si aggiungono i sensori di temperatura dei cuscinetti, dell'olio e dell'ambiente e un accelerometro che ci informa riguardo le eccitazioni ad alta frequenza prodotte all'imbocco fra i denti.

I piccoli riduttori ad ingranaggi invece prevedono l'utilizzo di cuscinetti a rotolamento e sono attrezzati di trasduttori di velocità e Dual Path Monitors.

I motori elettrici di grandi dimensioni impiegano cuscinetti a lubrificazione fluida montati con traduttori di prossimità XY, un sensore di prossimità assiale, un keyphasor e traduttori di temperatura di ogni cuscinetto, dell'olio, degli avvolgimenti rotorici e statorici. Considerando anche che questi motori hanno un centro magnetico che fa tendere al centramento il rotore, le misure assiali e radiali possono essere prese periodicamente.

Valutazione dello stato di una macchina

Lo stato di una macchina deve essere valutato confrontando le misure delle grandezze caratteristiche con i limiti imposti; questi limiti si suddividono in

quantitativi e qualitativi. I primi sono imposti dal costruttore per la specifica macchina in esame e riguardano le posizioni radiali e assiali, le velocità, le temperature e le pressioni. I secondi invece sono criteri indicativi stabiliti per generiche categorie di macchine che vengono espressi tramite dei severity charts (dei grafici nei quali inserendo la velocità e la frequenza di vibrazioni possiamo vedere se la situazione in cui ci troviamo è accettabile, buona, pessima, o giusta) o tramite le norme internazionali che comprendono la UNI1604266 e la UNI1604267. Di base, bisogna però sempre limitare l'ampiezza delle vibrazioni dell'albero o del supporto rispetto al basamento, questa ampiezza non dovrebbe mai superare il 10% delle ampiezze ammissibili per i supporti. Per valutare la pericolosità delle vibrazioni viene scelto un parametro caratteristico, il più diffuso è la velocità, ma possono anche essere scelti lo spostamento o l'accelerazione. La pericolosità di una vibrazione dipende dall'entità della deformazione e dall'affaticamento del materiale, la velocità, che può essere espressa come $\dot{X}=\omega X$ contiene esplicitamente entrambi i fattori. La misura dell'ampiezza dello spostamento è conveniente quando è fondamentale controllare lo spostamento alle basse frequenze, cioè minori di 10 Hz, per cui si avrebbero velocità accettabile ma deformazioni inammissibili. Scegliamo l'accelerazione solamente per vibrazioni con frequenza superiore ai 500 Hz le quali possono generare situazioni pericolose anche con limitate ampiezze e velocità di vibrazione.

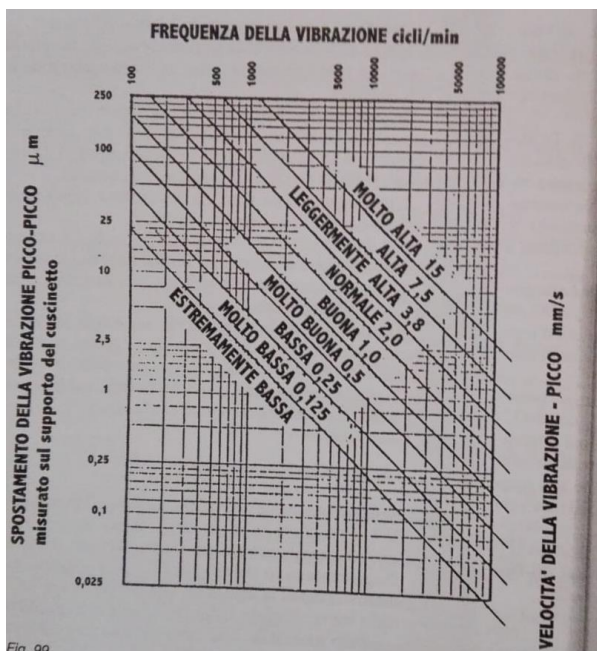


Figura 3 Severity chart di tipo generale

| Intervallo | Velocità RMS v in mm/s ai limiti dell'intervallo | Classe I | Classe II | Classe III | Classe IV |
|------------|--|----------|-----------|------------|-----------|
| 0,28 | 0,28 | A | A | A | A |
| 0,45 | 0,45 | | | | |
| 0,71 | 0,71 | B | B | B | B |
| 1,12 | 1,12 | | | | |
| 1,8 | 1,8 | C | C | C | C |
| 2,8 | 2,8 | | | | |
| 4,5 | 4,5 | D | D | D | D |
| 7,1 | 7,1 | | | | |
| 11,2 | 11,2 | D | D | D | D |
| 18 | 18 | | | | |
| 28 | 28 | D | D | D | D |
| 45 | 45 | | | | |
| 71 | 71 | D | D | D | D |

Tabella 1 Intervalli di severità delle vibrazioni ed esempi della loro applicazione alle piccole, medie e grandi macchine (classe

Il grafico di sinistra è un esempio di severity chart generale, questo prevede una misura a banda larga del valore di piccolo e fra due classi il dislivello è di 6 dB. In Europa è però preferibile esprimere le velocità in valore efficace, mentre in America (che utilizza questa tabella) si esprime in valori di picco, entrambi hanno i loro difetti: il primo non caratterizza bene il contributo dei componenti aventi alta frequenza, il secondo può però non variare quando queste componenti si presentano.

Le norme ISO 2372 e ISO 3945 fanno riferimento alle macchine operanti con velocità di rotazione tra i 10 e i 200 giri/s, secondo le norme va misurato il valore efficace della velocità di vibrazione nella banda 10÷1000 Hz secondo tre direzioni ortogonali in corrispondenza dei cuscinetti e dei supporti della macchina.

I vari tipi di macchine vengono raggruppati in sei classi. Le prime quattro classi rappresentano le piccole, medie e grandi macchine e le turbomacchine, definiti degli intervalli di velocità efficace si caratterizza la severità della vibrazione ricordando che A, B, C, e D corrispondono a

buono, soddisfacente, insoddisfacente e inaccettabile. Le classi V e VI invece avendo caratteristiche vibratorie molto varie sono inclassificabili.

Oltre ai limiti qualitativi devono essere presi in considerazione anche i limiti di spettro; questi sono stabiliti per ogni singolo modello di macchina e sono basati sulla definizione di spettro di riferimento che è lo spettro di una macchina in buono stato. Se dobbiamo confrontare lo spettro di una macchina funzionante con quello di riferimento si nota che la velocità della macchina non è mai la stessa rendendo impossibile il confronto. Ma se durante l'acquisizione si effettua un campionamento esterno controllato da un segnale tachimetrico si ottiene una normalizzazione della velocità, in questo modo l'informazione ottenuta è completa.

Analisi dei difetti superficiali e interni

Parallelamente al controllo delle vibrazioni, per quanto riguarda la manutenzione e la prevenzione dei macchinari bisogna andare anche a considerare l'ipotetica presenza di difetti superficiali o interni dei materiali. I difetti possono "nascere" con il materiale, derivare dai processi a cui i materiali sono sottoposti o essere generati nel corso dell'esercizio. È quindi importante, tanto quanto il monitoraggio delle vibrazioni, andare a individuare le anomalie per confrontarle con i limiti imposti dalle specifiche del prodotto. A tal proposito sono nate le prove non distruttive che consistono in sistemi di monitoraggio e diagnostica non invasivi. Andiamo ora ad analizzare le principali tecniche di controllo non distruttive.

Correnti indotte

Il metodo consiste nello sfruttare il campo magnetico generato da una bobina alimentata con corrente alternata che produce nel pezzo da esaminare delle correnti generate, la presenza di discontinuità modifica l'intensità e il percorso delle correnti e quindi l'impedenza la cui variazione è indice di possibile difettosità. Questo metodo è applicabile quando sono coinvolte variazioni chimico-fisiche di un conduttore, attraverso la bobina di prova può essere rilevata anche la minima disomogeneità che può essere dovuta a variazioni di tipo geometrico, elettrico o magnetico. Tramite questo metodo possiamo quindi rilevare disomogeneità associate alla geometria del materiale (cricche, deformazioni, inclusioni, variazioni di spessore), spessori di riporti non conduttivi su base conduttiva o viceversa, variazioni associate alla conduttività del materiale (disomogeneità delle leghe, surriscaldamenti localizzati, errori di trattamento termico), variazioni associate alla permeabilità del materiale attraverso la misura dell'intensità dei campi magnetici. Tutto ciò viene eseguito in condizioni di elevata sensibilità, affidabilità, rapida esecuzione e basso costo di esercizio. È utile per i casi in cui non deve esserci contatto diretto tra sonda e pezzo di prova. Le tecniche di esame si differenziano per l'applicazione manuale o automatica del metodo e il tipo di segnale prodotto dal difetto in relazione alle diverse caratteristiche delle sonde utilizzate. Il metodo è però applicabile solamente su materiali conduttori e per localizzare discontinuità superficiali a ridotte profondità. Le discontinuità vengono rilevate o misurando le variazioni di corrente nel circuito associate al diverso valore di impedenza, o osservano le variazioni di ampiezza e dell'angolo di fase del vettore dell'impedenza. Nel primo caso viene usato un microamperometro, nel secondo un oscilloscopio che visualizzi il piano d'impedenza della bobina.

Emissione acustica

Il principio si basa sulla rilevazione delle onde acustiche emesse da un materiale per deformazione, innesco o evoluzione di un difetto. Questo metodo non deve essere usato per rilevare tipo e dimensioni dei difetti presenti in una struttura, ma di registrare la loro evoluzione durante l'applicazione di una sollecitazione. Il metodo può essere utilizzato per ottenere preziose informazioni nel monitoraggio in linea di un componente in esercizio. Si applica alle prime prove idrauliche recipienti a pressione, al monitoraggio continuo di componenti o macchinari esercizio, alle prove a fatica di strutture componenti su scala ridotta, al controllo dell'usura di utensili e al controllo dei processi di saldatura, alle caratterizzazioni dei materiali compositi come ad esempio fibre di vetro fibre di carbonio calcio strutto. Questa prova permette in genere di rilevare, localizzare e classificare la sorgente emissiva. Per ottenere la localizzazione è necessario misurare la differenza dei tempi di arrivo dell'onda elastica dalla sorgente ai vari sensori disposti sulla struttura. La posizione della sorgente emissiva viene stabilita mediante tecniche di triangolazione che impiegano tre o più sensori, il numero dei sensori dipende dal volume e dallo spessore del componente in esame e dalle sue disomogeneità. L'attività acustica dei difetti dipende dalla temperatura e dal comportamento del materiale sotto esame; ad esempio gli acciai austenitici presentano una bassa emissività. Il carattere irreversibile dell'emissione acustica non consente di ripetere la prova, infatti non viene prodotta emissione acustica fino a che non si supera il carico precedentemente raggiunto, i difetti stabiliti durante la prova non vengono rilevati ma possono divenire pericolosi nel successivo esercizio del componente a causa della presenza di sollecitazione a fatica o a corrosione. La rilevazione delle onde acustiche avviene tramite sensori piezoelettrici; questi sensori vengono posti a contatto del corpo da

esaminare che verrà sottoposto ad una sollecitazione meccanica o termica. I segnali elettrici ottenuti vengono poi amplificati, filtrati eliminare il rumore di fondo inviati ad un dispositivo la misura delle grandezze caratteristiche e dei parametri della prova e poi ad un computer che elabora quali rappresenta su di un grafico.

Liquidi penetranti

Il metodo si basa sul fenomeno della capillarità cioè la tendenza di un liquido a risalire all'interno di un tubo capillare e sulle caratteristiche fisiche dei liquidi come la viscosità e la tensione superficiale. Il potere penetrante è fondamentale da questo dipende la sensibilità dell'esame. È un metodo adatto a rilevare difetti affioranti in superficie di qualunque tipo; possono essere rilevati difetti in fusioni come giunti freddi, cricche di ritiro, difetti di fabbricazione come cricche di tempra o di saldature, filature, sdoppiature di laminazione e difetti servizio come cricche di fatica e di tensocorrosione. Il risultato non dipende dal tipo di materiale né dalla struttura ma questo non deve essere poroso in superficie quindi non può essere applicato ad esempio ai materiali ceramici. Possono essere quindi controllati acciaio, alluminio, materiali compositi, ghisa e vetro. L'ubicazione del difetto di superficie viene rilevato con precisione dei liquidi penetranti ma le sue dimensioni di solito risultano ingrandite rispetto a quelle reali. Oggi giorno vengono utilizzati liquidi più sensibili e meno tossici e possono essere anche biodegradabili; per quanto riguarda il costo della depurazione le normative sono sempre più severe ed è per questo motivo che il costo dell'impianto è elevato. Sono in utilizzo diverse tecniche di esame a seconda del tipo di liquido, dell'oggetto da controllare e del numero di pezzi punto ogni tecnica ha il suo campo di applicazione particolare anche se le fasi sono sempre le stesse: prima di tutto viene applicato il liquido penetrante sulla superficie da

ispezionare, viene poi rimosso quella in eccesso si applica infine il rivelatore. L'esecuzione del controllo può essere manuale, semi automatica o Lottomatica. Tutti gli impianti devono essere dotati di mezzi e l'asportazione dei vapori per il trattamento delle acque reflue. I prodotti da utilizzare sono scelti in funzione della rugosità, della superficie del pezzo e della sensibilità di controllo desiderata: ad esempio su superfici grezze hanno migliori risultati i liquidi penetranti dotati di media sensibilità, mentre su superfici rettificate sono più performanti quelli fluorescenti e colorati ad altissima sensibilità. Questo metodo ha dei limiti infatti non rileva discontinuità sottopelle tu sei in superficie, non può essere applicato a superfici rugose o porose, si presta all'automazione solo per quanto riguarda la fase esecutiva, l'esame è limitato a zone facilmente accessibili, il controllo è possibile solo fra i 12 e i 56° C e la sensibilità del metodo è condizionata dal grado di finitura superficiale, d'altro canto la visualizzazione del difetto viene direttamente sul suo esame e contrasto fra penetrante rivelatore.

Magnetoscopia

Questo metodo si basa sulla deviazione che le linee del campo magnetico indotto in un materiale subiscono in presenza di una discontinuità. Il metodo rileva difetti superficiali e subsuperficiali in materiali ferromagnetici come cricche, incollature, inclusioni, ripiegature, sdoppiature e mancanze di penetrazione nelle saldature. Tipicamente viene applicato nelle fusioni in acciaio a struttura ferritica, ai fucinati, agli estrusi, agli stampati, alle saldature ed a altri componenti a matrice ferritica. I difetti saranno orientati in modo da essere intercettati dalle linee di forza del flusso magnetico indotto, per questo motivo il pezzo deve essere magnetizzato al minimo in due direzioni ortogonali fra di loro. La magnetizzazione dei pezzi può essere

condotta con la tecnica a passaggio di corrente nella quale il pezzo viene attraversato da corrente magnetizzante oppure con la tecnica ad induzione dove invece induciamo la magnetizzazione con un campo magnetico esterno. In contemporanea a questo passaggio si procede ad applicare il rilevatore che può essere in polvere per il controllo a secco o ad umido; quest'ultima tecnica è riservata ai casi dove i difetti superficiali sono molto piccoli o le superfici sono lisce, il controllo a secco invece viene usato su superfici non lavorate o che non richiedono un'eccessiva sensibilità. Nella magnetizzazione la corrente utilizzata può essere alternata, continua o raddrizzata. La prima fornisce la rilevazione di difetti superficiali, le altre di difetti subsuperficiali. Questo esame può però essere applicato a i solo materiali ferromagnetici, non evidenzia i difetti rotondeggianti, può essere automatizzato solo nella parte esecutiva, è limitato a zone facilmente raggiungibili e la temperatura massima è di 50 °C per i rilevatori umidi e di 300 °C per quelli a secco. La visualizzazione del difetto può avvenire o direttamente sul pezzo grazie a delle particelle magnetiche che lo evidenziano oppure mediante delle sonde.

Metodi ottici

Il metodo sfrutta la luce come mezzo rivelatore dei difetti: vengono analizzate la direzione, l'ampiezza e la fase grazie a le quali otteniamo informazioni sullo stato fisico dell'oggetto. Possiamo determinare sul pezzo in esame cricche, corrosioni, alterazioni di colore causate dal surriscaldamento, erosioni, deformazioni, finitura superficiale irregolare, montaggio dei sistemi meccanici errato e variazioni dimensionali. L'esame viene effettuato a d occhio nudo con l'ausilio di una lente di ingrandimento o telecamere. Queste ultime permettono di condurre esami sofisticati e di analizzare anche superfici inaccessibili. Il principale limite di questo metodo

consiste nel poter notare solo difetti superficiali che vengono osservati direttamente dall'esecutore.

Radiografia

Sfruttiamo la variazione di attenuazione che le radiazioni elettromagnetiche subiscono quando incontrano nel loro percorso attraverso il materiale. Sfruttiamo raggi X e Y grazie a i quali controlliamo getti, saldature, prodotti stampati, fucinati, materiali compositi, materie plastiche e componenti di costruzioni civili. Le tecniche d'esame sono sempre più evolute. Queste prevedono l'impiego di intensificatori di brillantezza e di intensificatori di ripresa aumentandone la sensibilità, l'immagine viene trasmessa su un monitor rendendone facile l'esaminazione. La scelta delle tecniche di esame dipende dal tipo di materiale, dalla sua forma, dalla temperatura del pezzo, dalla sensibilità richiesta e dallo spessore. Il massimo spessore radiografabile è di 500 mm negli acceleratori lineari ad alta energia, di 100 mm con apparecchi monoblocco.

Rilevazione di fughe

Quando in una parete che separa due ambienti a pressione diversa esiste una discontinuità passante, il fluido contenuto nell'ambiente a pressione maggiore passa a quello a pressione minore. La necessità di garantire la massima tenuta dei serbatoi o dei sistemi di tubazioni che contengono sostanze tossiche o che esercitano in impianti ad alto rischio a porta alla nascita di metodi non invasivi che possono rilevare fughe di gas o di liquidi. Solitamente a causare le perdite sono difetti strutturali, un pessimo accoppiamento meccanico o un'errata scelta della guarnizione. Le tecniche per controllare la tenuta di un componente sono molteplici:

la prova a bolle, la prova mediante variazione di pressione, la prova con diodo ad alogeni, la prova mediante spettrometria di massa, la tecnica di correlazione acustica. Tutte queste prove possono essere condotte sia pressurizzando il componente sotto esame che mettendolo sottovuoto. La prova a bolle di sapone permette sia di determinare che di localizzare le perdite, sfrutta come indicatori miscele di acqua e tensioattivi o rivelatori chimici, ma non è possibile quantificare l'entità della perdita. La prova di mediante variazione di pressione si esegue invece misurando le variazioni di pressione tra interno ed esterno del recipiente, permettendo anche di quantificare la perdita ma non di localizzare il punto preciso. La prova di tenuta mediante diodo ad alogeni si basa sull'effetto di Lungmuir-Taylor: un elettrodo di platino riscaldato alla temperatura di 850-950 °C emette ioni positivi che aumentano se le molecole di un gas tracciante contenente alogeni colpiscono la superficie dell'elettrodo il sistema può essere riempito con il gas tracciante scelto fino ad una certa sovrappressione in modo da rilevare i gas che fuoriesce dai punti di fuga. Lo spettrometro di massa consente l'identificazione delle specie atomiche o molecolari in funzione del loro rapporto tra massa e carica elettrica. Si utilizza l'elio come gas tracciante, diffondendolo all'interno di un recipiente in leggera pressione o sulla superficie del componente da controllare che è stato opportunamente messo sottovuoto e collegato al rilevatore di perdite. Il passaggio di elio attraverso le discontinuità passanti viene convogliato all'interno dello spettrometro misurando la sua pressione parziale. Per ultima la tecnica di correlazione acustica è impiegata nella ricerca di fughe sulle reti di acqua e gas, i sensori adatti al rilevamento del rumore causato dalle perdite vengono disposti in modo da localizzare le sorgenti di emissione acustica. È bene tenere a mente che queste prove richiedono personale qualificato e condizioni impeccabili di pulizia e

di taratura degli strumenti. Una scelta corretta della tecnica e dei parametri esecutivi può ottimizzare la sensibilità, il costo e l'affidabilità della prova. La sensibilità aumenta con la tecnica a vuoto rispetto a quella in pressione. Per visualizzare il difetto possono essere utilizzati fluidi indicatori o rivelatori chimici che assumono una particolare colorazione in corrispondenza delle perdite oppure si utilizzano sensori sofisticati che sfruttano l'effetto termoionico, la spettrometria di massa o rilevano il rumore prodotto dalla fuga.

Termografia

Il metodo termografico trova applicazione soprattutto in campo automobilistico per lo studio della messa a punto di pneumatici dei lunotti termici, dei freni, dei radiatori e dei turbocompressori viene anche applicata nella siderurgia nel settore aeronautico e nell'industria chimica. Consiste nell'applicare una sollecitazione termica, ne misurare la distribuzione delle temperature superficiali e nel visualizzarle per riconoscere eventuali anomalie. Bisogna distinguere però due casi: quando la sollecitazione termica è fornita direttamente dall'oggetto stesso durante il suo funzionamento o quando viene applicata durante l'esame con tecniche particolari. In entrambi i casi è necessario conoscere la distribuzione delle temperature superficiali in assenza di difetti in modo da confrontarla con la distribuzione reale. Purtroppo, se l'anomalia nella distribuzione delle temperature è troppo piccola non viene misurata e se le discontinuità sono troppo piccole non vengono rilevate perché nascoste dal rumore di fondo. La distribuzione delle temperature si può misurare o con vernici termosensibili con telecamere termografiche.

Ultrasuoni

Il metodo è basato sul fenomeno della riflessione che un'onda acustica subisce quando incontra un ostacolo nella sua propagazione. Gli ultrasuoni sono onde acustiche con frequenze maggiori di 25 MHz. L'impulso ultrasonoro viene trasmesso nel materiale da un trasduttore, gli impulsi riflessi dalla superficie del difetto o dalle pareti del pezzo vengono captati dal trasduttore, trasformati in segnale elettrico e rappresentati sullo schermo. Il campo di maggiore applicazione è il controllo di saldature, lamiere, fucinati, stampati, fusioni e materiali compositi. È il metodo più diffuso per il rilevamento dei difetti interni perché è facile, veloce, molto sensibile e permette di controllare spessori fino a 10 m. L'esame può avvenire sfruttando tecniche a contatto o in immersione: nel primo caso il trasduttore viene appoggiato direttamente sul pezzo usando come accoppiante acustico acqua o olio gelatina, nel secondo caso la sonda è mantenuta ad una certa distanza dal pezzo che varia in relazione allo spessore del pezzo da esaminare. La scelta di una delle due tecniche dipende dalla sensibilità di controllo, dalla forma geometrica dei pezzi, dal tipo e dall'orientamento dei difetti, dalla semplicità operativa e dalla velocità di ispezione richiesta. Solitamente applichiamo la tecnica per contatto a prodotti grandi e su strutture saldate, la tecnica per immersione nell'ispezione di grandi serie di particolari identici, in particolare in campo aeronautico. Il controllo mediante ultrasuoni incontra difficoltà nel controllare materiali ad alta attenuazione acustica o temperatura, nel controllo di pezzi a geometria complessa, la sensibilità è condizionata dallo stato superficiale del pezzo e l'interpretazione del segnale richiede esperienza. Il difetto appare direttamente sullo schermo sotto forma di oscillogramma.

Analisi degli oli per la rilevazione preventiva dell'usura in macchine rotanti

Ad oggi l'unica tecnica capace di individuare, localizzare e definire precocemente il tipo e le criticità dei fenomeni di usura è la ferrografia. Questa analisi oltre a rappresentare la tecnica più avanzata ed efficace nel campo del monitoraggio offre soprattutto la possibilità di definire le terapie più razionali laddove le anomalie si manifestano con ricorrenza indesiderata evidenziando un inadeguato impiego di materiali o di criteri di progettazione. Negli ultimi decenni sono state condotte molte indagini riguardo le particelle di usura prodotte durante il deterioramento tribologico degli accoppiamenti variamente interagenti, queste indagini hanno permesso di individuare alcune caratteristiche peculiari delle particelle che sono fondamentali per l'interpretazione e la diagnosi dei processi tribologici. In sostanza è stato possibile dimostrare che le particelle di usura conserva elementi caratteristici dei meccanismi di usura che le hanno prodotte, queste caratteristiche si dividono in caratteristiche quantitative (definite in termini di quantità e distribuzione dimensionale delle particelle) e qualitative (definite in termini di morfologia e natura dei frammenti prodotti). Con l'evoluzione dei fenomeni di usura le caratteristiche subiscono variazioni che, opportunamente rilevate e quantificate mediante la ferrografia, offrono un metodo efficace per la diagnosi dei sistemi

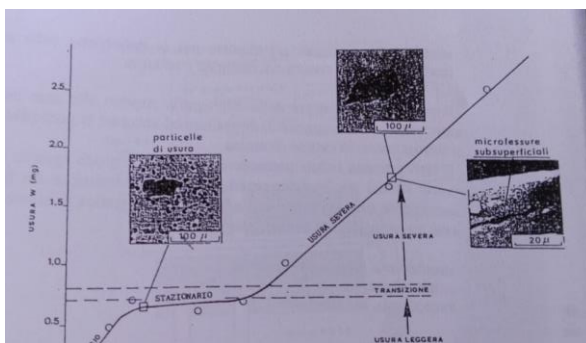


Figura 4 Curva di usura tipica

operativi.

Considerando la curva di usura ricavata in laboratorio da un accoppiamento pattino-anello in simulazione di un accoppiamento perno-boccola si osserva che esistono diverse zone di usura

caratterizzate da tassi di usura molto diversi e che esiste una zona di transizione di usura tra l'usura normale e quella anormale. Quando l'evoluzione tribologica di accoppiamento si approssima alla zona di transizione, le caratteristiche delle particelle prodotte subiscono ingenti variazioni. In figura notiamo infatti che partendo dalla transizione si riduce la percentuale di particelle di dimensioni minore di 10 μm (usura normale) mentre aumenta quella relativa alle particelle maggiori di 10 μm (usura severa). Quindi i processi di usura sono caratterizzati da quattro elementi fondamentali:

- Livello quantitativo correlato al volume totale delle particelle di usura prodotte e rappresentativo dell'entità dell'usura nelle zone di contatto
- Livello di severità correlato alla distribuzione dimensionale delle particelle prodotte e rappresentativo dell'intensità dei fenomeni di usura
- Distribuzione morfologica delle particelle significative che evidenzia con buona precisione i meccanismi di usura in atto
- Natura dei frammenti correlata ai materiali costitutivi delle particelle necessaria per localizzare le sorgenti o i gruppi di sorgenti di particelle

La ferrografia

La tecnica ferrografica consente la raccolta delle particelle di usura disperse nei fluidi lubrificanti e il deposito in ordine di massa su un substrato trasparente detto ferrogramma, la separazione e la selezione delle particelle grandi e piccole in due gruppi con localizzazione in zone diverse del substrato, la determinazione della concentrazione di particelle grandi e piccole mediante un lettore densitometrico e lo studio delle particelle significative per la definizione delle proprietà morfologiche e la natura dei materiali costitutivi. Il principale

vantaggio della ferrografia rispetto alle altre tecniche è rappresentato dalle capacità di depositare e da ancorare le particelle di usura sul ferrogramma in ordine di massa. Il ferrogramma infatti permette di condurre agevolmente precisamente le varie analisi per la determinazione delle caratteristiche dei frammenti diversamente non realizzabile. Le apparecchiature utilizzate sono uno strumento a lettura diretta, un analizzatore e un ferroscoPIO. L'esigenza di dover rilevare con tempestività alla situazione tribologica di sistemi operativi ha creato la necessità di sviluppare lo strumento a lettura diretta che permette di determinare i parametri quantitativi in termini di concentrazione e di distribuzione dimensionale delle particelle.

Lo strumento a lettura diretta

Un campione di olio di 1 ml contenente le particelle di usura viene prelevato dal circuito di lubrificazione del sistema in esame e viene diluito e fatto fluire attraverso un capillare di vetro calibrato posizionato tra i poli di un magnete statico opportunamente progettato. Il magnete costituisce il cuore dell'apparecchiatura ed è dotato di un elevato gradiente di flusso nella direzione in cui fluisce l'olio nel capillare. Le particelle magnetiche grandi vengono precipitate in corrispondenza della prima fibra ottica mentre quelle piccole in

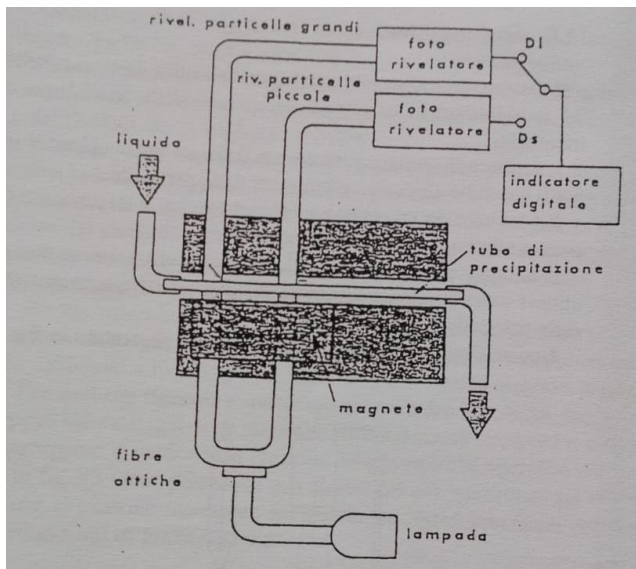


Figura 5 Schema operativo dello strumento a lettura diretta (DR)

corrispondenza della seconda
 posizionata 6 mm più a valle. Le
 particelle vengono lavate tramite
 un solvente per asportare ogni
 traccia residua di olio e di
 sostanze opacizzanti e viene fatto
 passare un raggio luminoso
 monocromatico gli appropriata
 sezione la cui intensità luminosa
 viene rilevata dai fotoresistori. La
 densità di particelle grandi DL e

piccole DS viene rilevata come attenuazione dei raggi luminosi prodotti dalla
 percentuale di superficie occupata dalle particelle. I valori di DL e DS forniscono
 L'indice quantitativo che rappresenta il volume totale di particelle prodotte $Q =$
 $DL + DS$. La differenza tra DL E DS fornisce l'indice di severità rappresentativo
 dell'intensità dei fenomeni di usura $S = DL - DS$. Per poter mettere sotto
 controllo i vari fenomeni di usura è stato adottato l'indice di usura definito come
 $I_s = Q \times S = (DL + DS) \times (DL - DS) = DL^2 - DS^2$. L'indice di usura rappresenta un
 parametro sensibile nel rilevare piccole variazioni nella densità di particelle
 grandi e piccole e quindi di innesco precoce di stati di usura anormali. Lo
 strumento a lettura diretta viene utilizzato come sensore di allerta e per lo
 sviluppo della trend analysis finalizzata al monitoraggio dei sistemi operativi.

L'analizzatore

L'analizzatore rappresenta lo strumento di base della ferrografia e risulta comunque l'unico strumento in grado di raccogliere efficacemente le particelle di usura e distribuirle in ordine di massa sul substrato trasparente denominato ferrogramma.

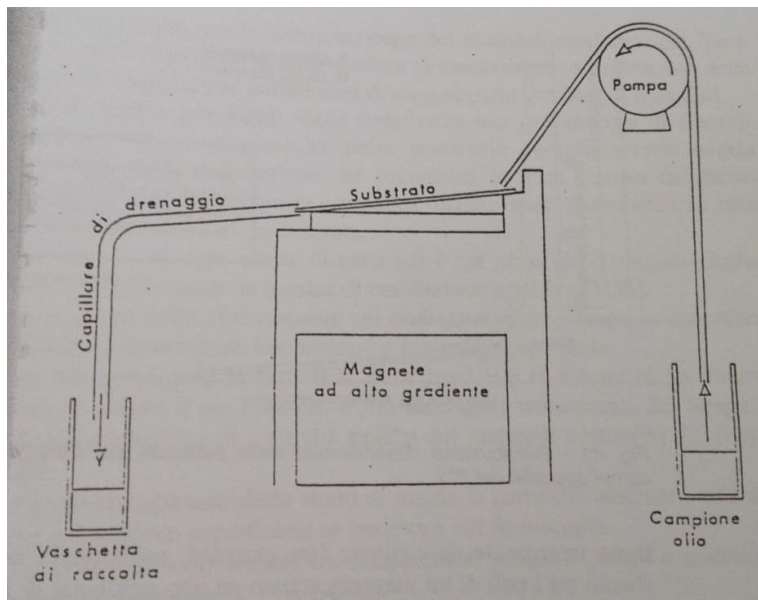


Figura 6 Schema funzionale dell'analizzatore

Un volume di olio di 3 ml contenente i prodotti di usura viene diluito e fatto fluire mediante una pompa peristaltica su un substrato trasparente denominato ferrogramma che è posizionato leggermente inclinato 3° di un magnete statico ad alto gradiente di flusso. Il substrato misura una lunghezza di 60 mm ed è trattato in modo da resistere senza deteriorarsi fino ad una temperatura maggiore di 600 °C. Nella zona centrale del ferrogramma viene prodotta con una fortuna c'era una barriera ad U che agevola il flusso dell'olio verso l'uscita. I frammenti di usura vengono magneticamente precipitati man mano che l'olio influisce sul ferrogramma. Le particelle di usura severa si depositano circa 6 mm più a valle. Dopo un ciclo di lavaggio mediante appositi solventi le particelle aderiscono perfettamente al ferrogramma che può essere utilizzato per lo studio dei frammenti al microscopio. Viene utilizzato per lo studio delle particelle

depositate su ferro grammi in termini di definizione della morfologia e natura dei frammenti, offre il maggior supporto possibile all'analisi qualitativa delle particelle.

Il ferrosocpio

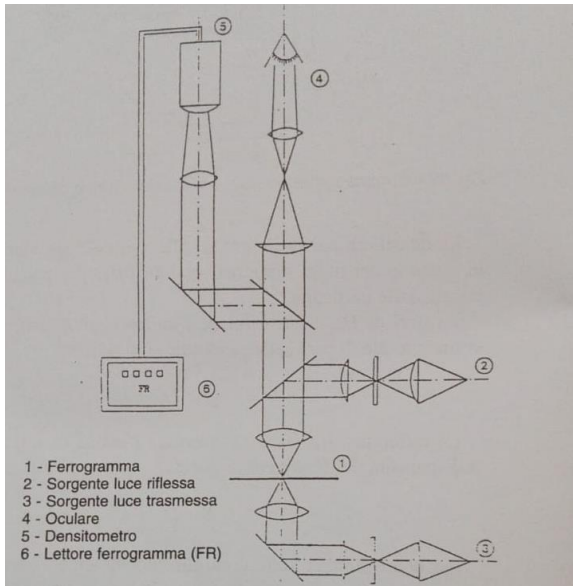


Figura 7 Schema del ferrosocpio

Il ferrosocpio è composto da un microscopio bicromatico interconnesso con videocamera e monitor ad alta risoluzione. Il microscopio consente di illuminare il ferrogramma con 2 raggi luminosi monocromatici di colore diverso contemporaneamente focalizzati sulle particelle di usura, solitamente il raggio che illumina per riflessione è rosso mentre quello che illumina per trasmissione è verde. In questo caso la

preparazione dell'operatore incide in modo decisivo sulla qualità del risultato, per agevolare il compito sono state sviluppate delle tecniche di osservazione mediante il ferrosocpio molto semplici ma sufficienti a fornire gli elementi necessari ad una diagnosi precisa. Per quel che riguarda l'analisi morfologica dei frammenti sono stati sviluppati dei cataloghi delle particelle completi e sufficienti a raggrupparle in funzione delle condizioni operative dei sistemi, per la determinazione dei materiali costitutivi dei frammenti sono disponibili delle procedure di osservazione e trattamento delle particelle e semplici che permettono di raggrupparli in Cassa di materiali. Infatti all'interno di ogni classe di materiali è possibile distinguere leghe

specifiche utilizzando la tecnica di ossidazione selettiva (TOS). Il suo impiego consiste nel riscaldare il ferro grammi in atmosfera ambiente a determinate temperature e per tempi controllati virgola in questo modo la superficie delle particelle si ricopre di uno strato di ossido il cui spessore dipende dalla temperatura, dal tempo e dalle caratteristiche delle attività tipiche dei materiali costitutivi dei frammenti. Il ferroscoPIO può anche essere dotato di un lettore del ferrogramma costituito da una cellula foto elettrica che utilizzando illuminazione del microscopio permette di determinare la densità delle particelle in un punto qualunque del ferrogramma. L'impiego del lettore permette di monitorare il processo di usura atipici come fenomeni di usura atipici, come l'usura corrosiva, presenti nei sistemi operativi lubrificati.

Applicazione e affidabilità delle prove non distruttive (PnD)

Le prove non distruttive sono spesso sottovalutate nel campo della prevenzione, sia perché poco conosciute che per mancanza di tempo. Infatti è necessario saper programmare in maniera efficiente tutti gli interventi da fare presso gli impianti industriali. Per poter intraprendere un programma che adotta le Pnd bisogna innanzitutto elaborare una check list che segua le seguenti regole:

1. Classificare i componenti seconda dei livelli di criticità, tenendo conto dell'importanza strategica di ogni singolo componente
2. elencare per i vari componenti tutti i dati necessari come il tipo di materiale, i dati di processo, le ore di funzionamento e le condizioni di esercizio
3. raccogliere e catalogare indicazioni fornite da presidente esperienze sugli stessi componenti o su componenti simili
4. stabilire le cause e le modalità più probabili di degrado

5. stabilire quindi le PND più adeguate per verificare i danni subiti dai componenti peccato stabilire una sequenza cronologica di tutte le azioni necessarie da effettuare prima, durante e dopo le prove non distruttive
6. definire i tempi necessari all'intervento in relazione anche ad altri interventi di manutenzione che potrebbero andare ad interferire o a creare dei ritardi

Andando ad elaborare questo tipo di elenco si razionalizzano le ispezioni non distruttive in servizio andando anche ad incidere economicamente il non appesantendo con tempi morti e controlli non necessari la manutenzione. I controlli in esercizio, come le prove non distruttive, l'operatore deve poter accedere a tutte le superfici del componente necessarie per effettuare la prova. Questo problema può essere risolto accedendo al progettista di tenere in considerazione questa necessità. Esso dovrà anche andare ad agire sull'agibilità della zona antistante il componente da analizzare cercando di ridurre la pericolosità dell'ambiente, l'alta temperatura, la vicinanza ad agenti pericolosi. I controlli in esercizio, come le prove non distruttive, l'operatore deve poter accedere a tutte le superfici del componente necessarie per effettuare la prova. Questo problema può essere risolto accedendo al progettista di tenere in considerazione questa necessità. Esso dovrà anche andare ad agire sull'agibilità della zona antistante il componente da analizzare cercando di ridurre la pericolosità dell'ambiente, l'alta temperatura, la vicinanza ad agenti pericolosi. In assenza di queste informazioni c'è il pericolo o di applicare metodologie inadeguate o di dover impiegare PND in modo intensivo per garantire la riscontrabilità di ogni tipo di difetti. Una volta definito il difetto minimo accettabile e fondamentale il confronto con difetti artificiali di forma e dimensioni standard praticati su blocchi di calibrazione, in supporto ciò esiste la normativa nazionale e internazionale che suggerisce anche le procedure di esame più corrette.

Tab. 2 - Campo d'impiego e limitazioni

| Test PnD | Simbologia | Applicazioni | | Limitazioni |
|---|------------|--------------|-----|--|
| | | 1-2 | A-B | |
| Radiografico | RT | 1-2 | A-B | Gli spessori massimi radiografabili sono in relazione alle energie disponibili; normalmente per le energie utilizzate in servizio gli spessori massimi sono nell'ordine di 80-100 mm di acciaio. Le discontinuità per essere rilevate devono avere andamento parallelo alla direzione delle radiazioni ionizzanti. Lavorare a temperature eccedenti i 50 °C diviene critico e necessitano particolari accorgimenti. |
| Ultrasonoro | UT | 1-2 | A-B | Strutture grossolane (es. fusioni o saldature austenitiche) creano problemi, non sempre risolvibili, di attenuazione. La preparazione superficiale deve essere molto accurata. Temperature massime delle superfici di esame 180-200 °C. |
| Ultrasonoro a caldo | EMA | 2 | A | Solo spessimetrici. Temperatura massima della superficie d'esame 750 °C. |
| Magnetoscopico | MT | 1 | A-B | Esame eseguibile solo su materiali ferromagnetici. Temperatura massima della superficie d'esame 300 °C. |
| Liquidi Penetranti | PT | 1 | A-B | Occorre saper valutare i sistemi più adeguati di pulizia delle superfici. Temperatura massima della superficie d'esame 200 °C. |
| Correnti indotte (Eddy Current) | ET | 1 | B | Controllo influenzato da molteplici variabili, per cui la sensibilità va verificata caso per caso. Il controllo di materiali ferromagnetici risulta spesso critico |
| Emissione Acustica | AE | 1-2-3 | A-B | Vengono rilevati solo difetti in fase dinamica. Difficoltà a discriminare i diversi segnali. Il componente deve essere comunque sollecitato. |
| Termografico | TT | 1-3 | A | Le aree di indagine devono essere visibili. Oggetti a bassa emissività sono di difficile indagine. |
| Ricerca di fughe (Leak Test) | LT | 3 | B | Su componenti di grandi dimensioni diventa critico creare un accettabile grado di vuoto. La pulizia del componente, soprattutto riguardo all'umidità, rappresenta una condizione critica del lavoro. |
| Esame visivo | VT | 1 | A-B | Le zone da esaminare devono essere accessibili. |
| Metodo elettrico | ME | 1 | A-B | La forma e orientamento delle discontinuità può influire sulla precisione del controllo. |
| Metodi scintillometrici | MS | 1 | | Sono effettuabili solo su materiali non conduttori applicati su un supporto metallico. |
| Analisi chimiche metallurgiche e di durezza | AM | 1 | A-B | La superficie da esaminare deve essere accessibile e preparata adeguatamente. |

Rispetto ai campi di applicabilità le PnD possono essere distinte in tre classi: la prima classe riguarda quelle superficiali o sub superficiali che sono idonei a rilevare discontinuità superficiali o sub superficiali, la seconda classe invece riguarda le prove idonee a rilevare nei materiali discontinuità site all'interno dei materiali, per ultima la terza classe riguarda le prove

idonee a verificare la funzionalità di un componente o di un sistema nella sua globalità. Invece considerando le fasi di intervento le PnD vattene essere classificate come di classe A cioè quelle per interventi con impianto in funzione mentre di Classe B cioè quelle con interventi ad impianto fermo. Tutto ciò viene riassunto dalla tabella di lato.

Anomalie più frequenti negli impianti industriali e risoluzione

Deformazione

È il risultato di una sovrasollecitazione termica o meccanica e può essere accompagnata da variazione delle caratteristiche metallurgiche, da riduzione di spessore o dalla formazione di cricche. Si parte con un esame visivo per individuare la collocazione e l'entità del problema, si procede poi con un'analisi ad ultrasuoni, un'analisi con liquidi penetranti per ricercare difetti superficiali, uno studio con magnetoscopio per ricercare difetti superficiali e subsuperficiali e infine analisi chimiche, metallurgiche e di durezza per rilevare eventuali variazioni nelle strutture.

Blistering

Anche detto "bugne da idrogeno", è un difetto dovuto alla diffusione dell'idrogeno atomico liberato da reazioni chimiche all'interfaccia metallo-fluido. Grazie alle sue dimensioni, penetra nel materiale e, in presenza di microcavità o segregazioni, si modifica trasformandosi in idrogeno molecolare ed esercitando forti pressioni e creando il distacco del materiale con formazione di bugne. Se le bugne si formano sul lato visibile si procede tramite un esame visivo e successivamente un esame con ultrasuoni per delimitare l'area interessata al fenomeno e verificare la presenza di fessurazioni in seno a giunti saldati.

Surriscaldamenti

Sono pericolosi se avvengono su componenti sollecitati meccanicamente, a causa del decadimento delle caratteristiche tensili. Si rischia lo scorrimento viscoso e

accentuazione di fenomeni corrosivi. Si parte da un esame visivo che fornisce il quadro esatto del fenomeno per poi passare a un'analisi termografica per individuare i punti surriscaldati, è però possibile farlo solo se il surriscaldamento è in atto. Tramite uno studio con ultrasuoni a caldo si fanno controlli spessimetrici fino a 75°C e si finisce con un'analisi metallografica con replica per stabilire l'entità del degrado.

Corrosione o erosione uniforme

Sono causate da particolare aggressività del fluido contenuto, da pH, da conducibilità e da alta velocità. Tramite un esame con ultrasuoni si procede a fare controlli spessimetrici secondo criteri legati all'estensione e ubicazione del fenomeno corrosivo-erosivo. Le correnti indotte invece effettuano controlli spessimetrici fino a 10 mm, vengono usate con maggiore frequenza nel controllo di fasci tubieri di scambiatori di materiale sia amagnetico che ferromagnetico. Si conclude l'esame con un controllo con radiografia per avere una visione di insieme dello spessore della sezione.

Corrosione localizzata

Detta anche pitting è dovuta ad agenti specifici o particolari situazioni di corrosione. Si parte con un esame ad ultrasuoni eseguito con sonde piane doppie emittenti-riceventi. Questo controllo è efficace nel dimensionamento di anomalie, ma non per l'individuazione perché troppo lungo e costoso. Si procede poi con un esame a raggi X che seppur lungo consente di valutare la gravità delle corrosioni per confronto tra zone a diversa densità radiografica. Tramite magnetoscopia si controllano le

superfici più grandi come fondi di serbatoi o piping. Se però le superfici sono eccessivamente grandi si utilizza il controllo con liquidi penetranti.

Superfici a contatto con selle e sostegni vari

La presenza di selle e sostegni può compromettere o degradare le protezioni contro la corrosione del componente, favorendo accumuli di umidità che possono raggiungere il metallo. Si parte da un esame visivo che serve ad evidenziare fenomeni macroscopici di degrado per poi passare agli ultrasuoni che si effettuano sulla superficie del metallo opposta a quella con le selle e sostegni. Nel caso di tubi il controllo è da effettuarsi internamente sfruttando apparecchiature automatizzate.

Superfici a contatto con diaframmi

La presenza di diaframmi negli scambiatori può indurre tre tipiche anomalie sui tubi sottostanti: ammaccature prodotte dalle vibrazioni e relativi sbalzi, ammaccature prodotte da un aumento di volume degli ossidi generati tra tubo e diaframma e fenomeni erosivi-corrosivi localizzati dovuti alla presenza di fluidi in fase mista liquido-gas. L'esame si effettua tramite correnti indotte, utilizzando la tecnica a multifrequenza è infatti possibile rilevare i difetti, eliminando i segnali di disturbo provocati dalla massa metallica del diaframma stesso.

Anomalie dei rivestimenti refrattari

Il danneggiamento è dovuto a cause meccaniche e termiche e causa disperdimento energetico e surriscaldamento. Per rilevare le anomalie a distanza si usa la termografia, se gli impianti sono fermi si può procedere anche con un esame visivo.

Anomalie delle coibentazioni

Il danneggiamento è prodotto da cause meccaniche, termiche o chimiche e causa dispersione energetica e infiltrazioni di umidità ed agenti aggressivi. Per individuarle si usa la termografia che ne rileva la posizione ma non fornisce informazioni sullo stato del metallo, l'esame visivo permette di verificare la presenza di corrosioni e l'esame ad ultrasuoni le quantifica.

Anomalie di rivestimenti non conduttori

Per rivestimenti non conduttori si intende verniciature protettive, smaltature, ebaniture, ecc. Le cause di degrado di questi rivestimenti possono essere shocks termici, meccanici e attacchi chimici. L'esame visivo è utile per individuare i casi più appariscenti, per la ricerca di piccole fessurazioni invece si usano liquidi penetranti. Con metodi scintillometrici si verifica se il rivestimento, pur senza rottura, può aver perso le sue caratteristiche dielettriche e infine tramite correnti indotte si rileva lo spessore del rivestimento non conduttivo se applicato su superfici conduttrici.

Anomalie di rivestimenti conduttori e placcature

Solitamente i materiali impiegati per rivestimenti o placcature sono acciai della serie AISI 300 o 400, leghe di rame o piombo. In esercizio questi rivestimenti possono criccarsi, staccarsi o corrodersi per l'azione di shocks termici, meccanici e attacchi chimici. Il metodo di analisi più rapido, soprattutto per superfici estese, è quello dei liquidi penetranti. Il migliore è però quello tramite ultrasuoni che può essere eseguito sia sul lato placcato che sul mantello, determinante per la sensibilità del controllo è la struttura del rivestimento: per strutture grossolane si devono utilizzare trasduttori ad onde longitudinali a fascio angolato. Solo per il lato placcatura e per

difetti affioranti e subsuperficiali possiamo usare le correnti indotte, mentre per rilevare difetti non planari si possono usare le radiografie.

Cricche di varia natura

Risultano dall'azione combinata di sollecitazioni termiche o meccaniche e un mezzo corrosivo critico o da stress eccessivo. Usando i liquidi penetranti è bene scegliere metodologie ad elevata sensibilità con tempi di penetrazione del rivelatore lunghi. Se si usa la magnetoscopia la procedura deve essere molto accurata considerando le dimensioni anche minime delle cricche. Usando invece gli ultrasuoni è necessario usare frequenze più alte possibili e angolazioni diverse dei trasduttori, talvolta le cricche possono presentare superfici di frattura così ravvicinate da risultare non rilevabili ultrasonoricamente. Tramite metodo elettrico si riesce a determinare con buona precisione la profondità delle cricche affioranti in superficie. Per ispezionare zone poco accessibili come filettature, sedi di chiavette o fori si ricorre alle correnti indotte. Per migliorare invece la sensibilità del controllo si utilizzano i raggi X.

Depositi interni in tubazioni

La presenza di depositi interni su tubi di forni o caldaie ostacola lo scambio termico e fa elevare notevolmente la temperatura portando a rottura i tubi. Si procede tramite un esame radiografico per rilevare e misurare lo strato di deposito, ma è possibile solo a forno spento e non permette di effettuare un controllo intensivo. È infatti preferibile utilizzare la termografia per individuare i depositi a forno acceso. Per effettuare i controlli è fondamentale che i forni sia predisposti con delle finestrelle apposite sulle pareti.

Attacco da idrogeno

È un processo degenerativo provocato dall'idrogeno ad alta temperatura su materiali in acciaio al carbonio basso legati. Si manifesta con generazione di macro e microcricche. Tramite ultrasuoni in funzione della struttura del materiale si usano le normali metodologie e se la struttura è grossolana, si utilizza la tecnica in trasparenza basandosi sull'attenuazione che subisce il fascio ultrasonoro. L'analisi a raggi X è sensibile per difetti di una certa dimensione ed è un metodo lento.

Processi di carburazione

Sono causati dalla diffusione di carbonio sulla matrice metallica e accentuati da surriscaldamenti che possono comportare anche riduzioni di spessore. I componenti più soggetti a questo fenomeno sono i tubi di forni cracking.

Difetti in saldatura

I giunti saldati essendo fonti di tensioni, alterazioni strutturali e discontinuità sono punti preferenziali di formazione di cricche di varia origine. Quindi andremo ad effettuare gli esami tipici della rilevazione di cricche. È bene però ricordare che, nel caso di saldature di acciai austenitici, gli esami con ultrasuoni con onde trasversali sono poco significativi, è preferibile ricorrere a trasduttori ad onde longitudinali a fascio angolato che permettono migliori definizioni.

Esami globali dell'impianto o del componente

Talvolta è comodo usufruire delle tecniche non distruttive per un esame complessivo sullo stato del componente.

Prova di tenuta o ricerca di fughe

Per valutare la sicurezza di un componente, specie se contenente fluidi pericolosi, la verifica della tenuta è indispensabile per la messa in esercizio. Le tecniche più diffuse sono: prova idraulica, prova pneumatica, ricerca di fughe con gas alogeni e ricerca di fughe con elio e spettrometro di massa. Queste prove si applicano principalmente ai contenitori in pressione e agli scambiatori di calore con lo scopo di determinare la perdita complessiva e determinare e localizzare la singola perdita sui bocchelli o sulle saldature, specie quelle tra tubi e piastra tubiera.

Emissione acustica

Questo metodo valuta le discontinuità, all'interno di un componente, in base ai segnali acustici prodotti quando queste sono in fase dinamica e richiede che il componente sia perennemente sotto sforzo. Il maggior vantaggio della tecnica è la monitoraggio, per tempi anche lunghi, del componente nel suo insieme o di discontinuità, di cui si conosce la presenza, per seguirne l'evoluzione. Viene usata anche per la ricerca di perdite su serbatoi e tubazioni.

Termografia all'infrarosso

Questa tecnica viene impiegata in diversi campi. Nella manutenzione si ricercano difetti che possono compromettere il funzionamento di un impianto o parte di esso, ad esempio la caduta localizzata di refrattari di un forno o di un reattore. Permette anche di individuare le perdite globali di energia da un componente per decidere se è più conveniente intervenire per eliminarle o continuare ad esercitare il componente. Dopo i lavori di riparazione delle anomalie riscontrate con indagine

termografica, si dovrebbe verificare la bontà degli interventi del progettista e del responsabile dei lavori.

Case study

Harley Davidson

L'Harley Davidson è un esempio di perfetta manutenzione tanto che vantano di dirigersi a gonfie vele verso il 100% di manutenzione proattiva in modo da ottimizzare il processo di produzione. Per rendere possibile ciò è stato necessario investire sulle ultime tecnologie, ma soprattutto di assumere personale unicamente incaricato di effettuare manutenzione; infatti su 1000 dipendenti ben 148 sono incaricati di fare manutenzione ogni ora, questa manutenzione viene però effettuata in maniera non invasiva e senza fermare il processo di produzione. Ognuno degli operai incaricati della manutenzione ha seguito in corso di formazione specifico per una singola tecnica. Il primo problema risolto riguarda la contaminazione degli olii in entrata, analizzandolo infatti ci si è resi conto che non era pulito come pensavano, infatti il fluido era concentrato in dei serbatoi non filtrati. Attraverso un sofisticato sistema di lubrificazione sono arrivati ad ottenere livelli di contaminazione dell'olio a un minimo di 3 micron. Un team si sta inoltre occupando dello studio dell'analisi dei detriti di usura in modo da prevedere con un cospicuo anticipo di tempo quando una macchina sta dando i primi segni di usura ed intervenire tempestivamente. Un'altra novità introdotta è l'uso della termografia che permette di scansionare regolarmente i quadri e le singole macchine alla ricerca di zone più calde a dover arrestare la produzione. Ad esempio prima le politiche di manutenzione richiedevano l'arresto del generatore per poter effettuare i controlli, ora invece senza tempi morti si riesce a fare la manutenzione in 15 minuti. Sono riusciti persino a

rilevare un problema difficile da rilevare, la temperatura all'interno di un pannello era di 146 °C e non avrebbe funzionato ancora per molto. Grazie alla termografia sono riusciti a rilevare il problema.

Monitoraggio delle condizioni delle piattaforme di perforazione

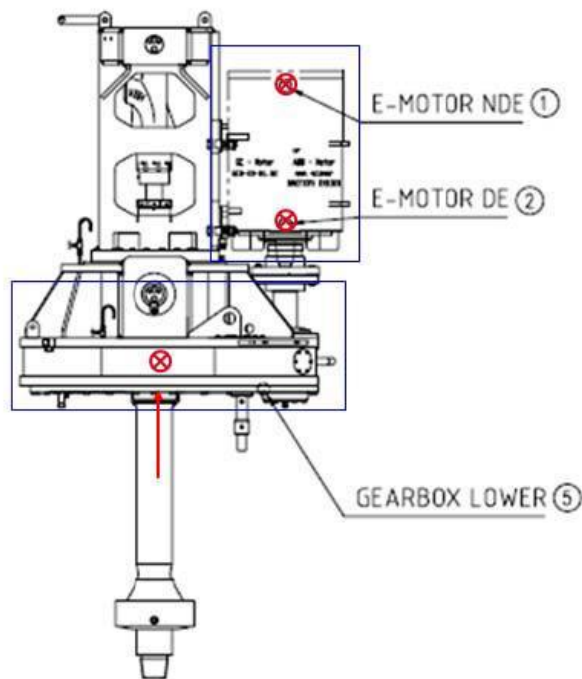


Figura 8 Punti in cui sono stati raccolti i dati sulle vibrazioni

Esistono diversi tipi di piattaforme di perforazione ma tutte sono autosufficienti per quanto riguarda il fabbisogno idrico e quello energetico ed è necessario che su tutte le attrezzature si faccia manutenzione correttamente sia per permettere il corretto funzionamento della piattaforma che per evitare incidenti. Le macchine più importanti da monitorare sulle piattaforme sono i trapani, il disegno opere, le pompe, i covoni e i propulsori. Se la perforatrice diventa inutilizzabile la piattaforma non può proseguire la perforazione che è essenziale per lo svolgimento del lavoro. Le

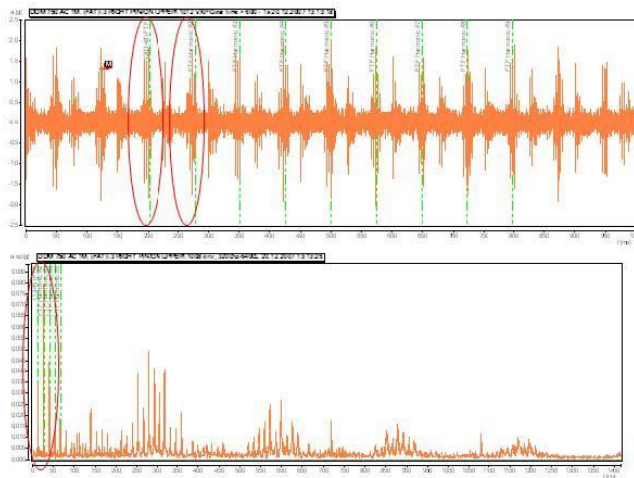


Figura 9 Diagramma della forma d'onda temporale e involuppo dopo l'azione correttiva. In blu sono rappresentati i dati raccolti dopo la sostituzione del cuscinetto difettoso.

perforatrici sono soggette a vibrazioni, difficili da misurare perché essendo la macchina a velocità variabile ha un basso numero di giri e i carichi sono variabili. Durante l'analisi dei dati della perforatrice si verificano molti fenomeni transitori. Per raccogliere dati su una perforatrice DDM 750 AC 1M in officina è stato usato un raccogliore di dati Vibxpertvibration di Ludeca. Grazie a questo strumento, che può raccogliere 100.000 linee di risoluzione, si può acquisire qualsiasi evento transitorio che potrebbe verificarsi. A macchina scarica sono stati raccolti i dati sulle vibrazioni: la velocità dell'albero principale è di 216 giri/min, il motore gira a 1762 giri/min.

Una volta raccolti i dati sono inseriti in un software, nel nostro caso Omnitends, per l'analisi. L'analisi delle vibrazioni sulla macchina durante il test di collaudo in

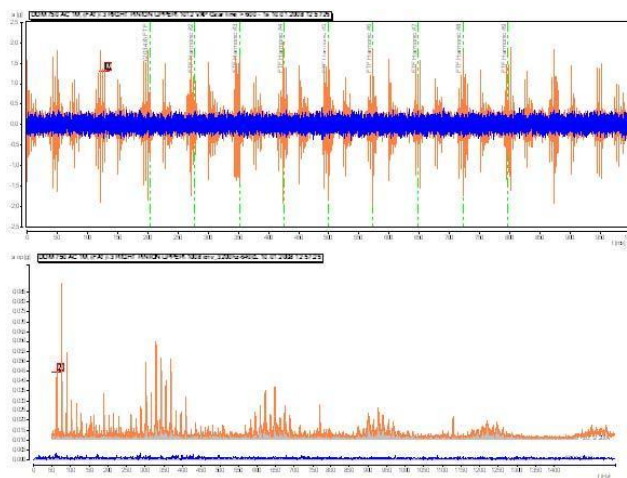


Figura 10 Diagramma della forma d'onda temporale e involuppo prima dell'azione correttiva. Il difetto è cerchiato in rosso.

fabbrica (FAT) ha rilevato gli impatti della gabbia nel cuscinetto superiore del pignone. A causa dei difetti evidenziati la fabbrica ha deciso di sostituire i cuscinetti prima che il trapano fosse spedito al cliente. Una volta rimosso il cuscinetto difettoso e analizzato sono stati rilevati numerosi difetti superficiali.

Analisi delle vibrazioni su un riduttore epicicloidale

Dai dati registrati durante l'analisi si evince che la frequenza di interesse è visibile a 37.915,18 cicli al minuto (CPM) con un'armonica di frequenza di nuovo visibile a 75.831,6 CPM. Le bande laterali sono visibili su entrambi i lati della frequenza in

esame. Diagnosticare i problemi in questo caso è stato abbastanza complesso poiché l'unità in esame è un gruppo di ingranaggi planetari, cioè l'albero di ingresso (ingranaggio solare) ha tre ingranaggi che ruotano attorno all'ingranaggio solare che a sua volta si ingrana con l'ingranaggio esterno. Studiando bene i dati raccolti si nota un segno caratteristico degli ingranaggi con difetti sui denti, infatti nella parte inferiore dell'immagine è evidente l'impatto della forma d'onda temporale.

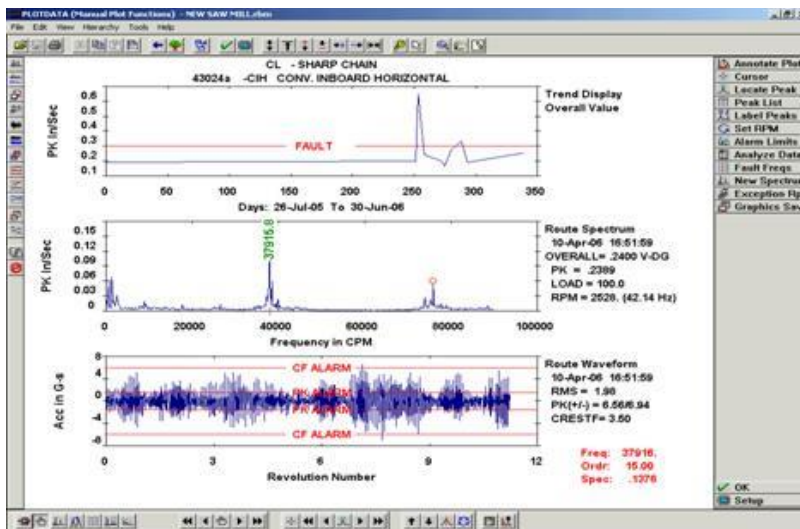


Figura 11 Dati raccolti durante l'analisi del riduttore

Il difetto sui denti è causato dalla contaminazione dell'olio all'interno dell'unità. Le pressioni tra i denti quando ingranano possono raggiungere anche i 20684,28 bar. Lo sporco è molto più duro del metallo e quando viene premuto contro i denti causa rientranze, spalling e violature. Grazie all'analisi delle vibrazioni è stato possibile individuare il problema prima ancora che il meccanismo giungesse a rottura. Questo problema è rilevabile anche tramite l'analisi degli oli, infatti prendendone un campione si sarebbero trovate delle particelle di metallo nel liquido.

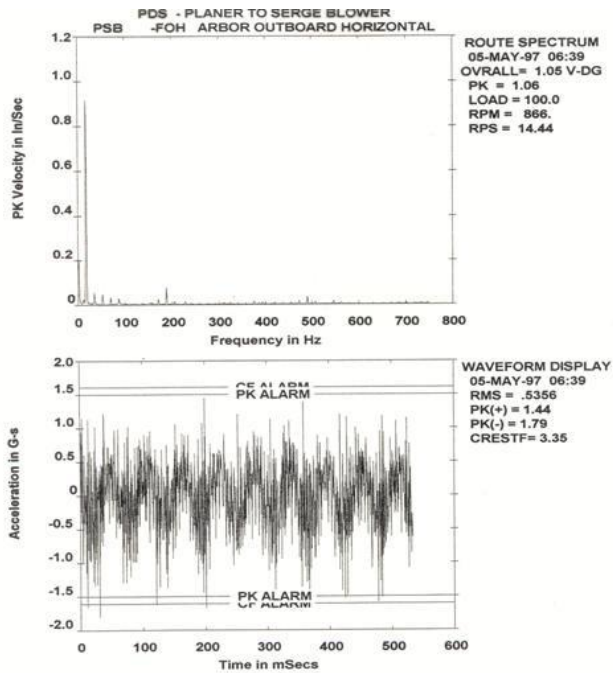
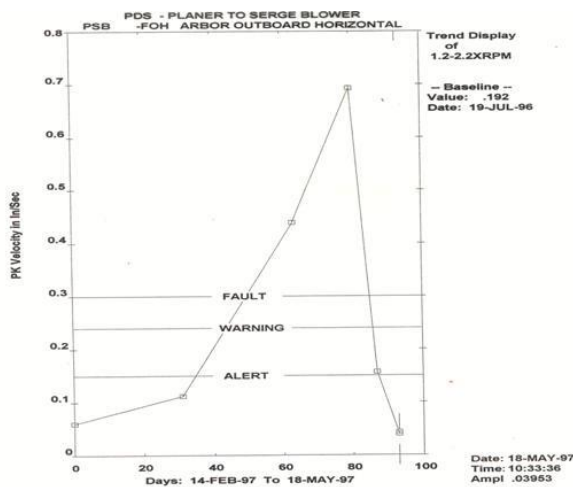


Figura 12 Dati di vibrazione di un ventilatore

Dopo il completamento del bilanciamento (Figura 13) si nota un drastico cambiamento di ampiezza, la riduzione delle vibrazioni prolungherà la vita dell'apparecchiatura e consentirà il funzionamento senza problemi. Una volta



Le procedure correttive di manutenzione possono ridurre la certezza di guasti catastrofici. In figura 12 possiamo vedere i dati di vibrazione di una soffiante che necessita un bilanciamento. Lo sbilanciamento è stato notato grazie all'ampiezza elevata alla velocità di esecuzione 1X. La figura 13 mostra invece la riduzione delle vibrazioni dopo il bilanciamento.

rilevato e risolto il problema è però fondamentale evitare che questo si verifichi di nuovo.

Figura 13 Andamento della vibrazione dopo il bilanciamento

Caso studio sulla termografia

Tramite la termografia a infrarossi è facile rilevare l'ubicazione precisa del problema e inoltre è semplice eseguire una diagnosi precisa.

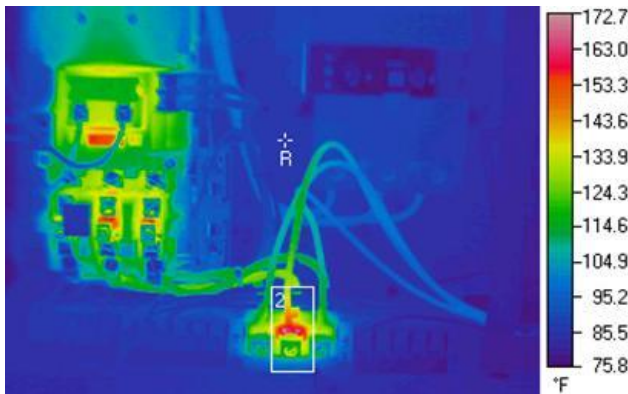


Figura 14 Dati a infrarossi dell'avviatore motore

In figura possiamo vedere i dati ottenuti tramite termografia di un avviatore di controllo di un motore. La temperatura del rettangolo evidenziato identifica che il terminale B ha una temperatura massima di 78,22 °C, quando si raggiunge questa temperatura il filo si brucerà e

spezzerà causando avarie al motore. Andando ad agire preventivamente, grazie alla termografia, si risolverà il problema e il motore continuerà a funzionare correttamente.

Ottimizzazione delle condizioni del lubrificante

La durata e l'affidabilità dei macchinari ingrassati dipendono dalla corretta lubrificazione dei cuscinetti. Una delle modalità di guasto più comuni è dovuta all'inadeguata lubrificazione, l'analisi delle vibrazioni è la metodologia più utilizzata per determinare i difetti di lubrificazione ma purtroppo non rileva i difetti precoci. Può essere utilizzata anche la termografia ma la carenza di lubrificazione ha un impatto limitato sulla temperatura. Quindi gli strumenti prediletti sono l'analisi ultrasonica e l'elaborazione avanzata del segnale di vibrazione perché misurano l'energia di sollecitazione causata dall'attrito tra gli elementi di rotolamento e di

scorrimento nei cuscinetti. Nei cuscinetti volventi il suono di lubrificazione viene creato dalle onde di stress indotte dall'attrito tra il rullo e gli altri elementi.

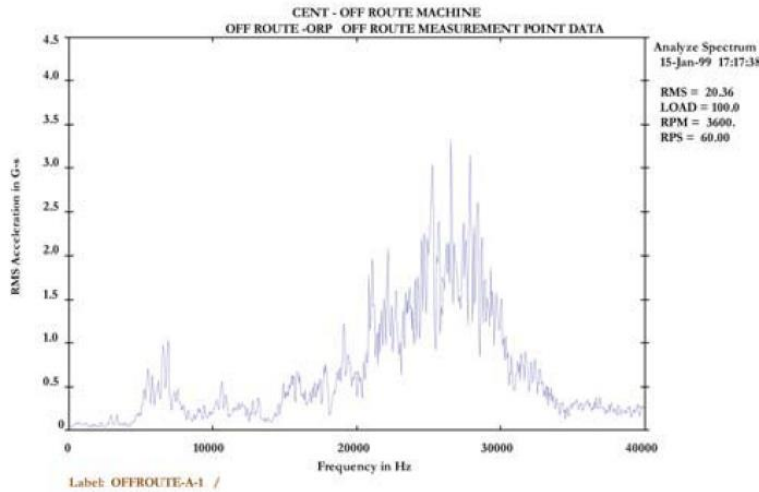


Figura 15 Dominio della frequenza di un cuscinetto sotto-lubrificato

determinando un maggiore coefficiente di attrito che crea energia sotto forma di calore e di suono.

L'energia sonora dei cuscinetti lubrificati è ad alta frequenza, a banda larga e il rumore è casuale e non periodico. Nell'intervallo da 20 a 32 kHz è evidente la gobba di energia. Man mano che la lubrificazione del cuscinetto si riduce, le caratteristiche del suono ad alta frequenza cambiano. Un cuscinetto correttamente lubrificato crea rumore casuale con un flusso a basso rumore. Con il proseguire della degradazione del lubrificante, il rumore di fondo inizia a sollevarsi. Gravi difetti di lubrificazione causano picchi di ampiezza più frequenti. Ovviamente però le ampiezze, i modelli sonori e le frequenze dell'energia di stress sono influenzati da: velocità, geometria del cuscinetto, design e qualità del rullo, carichi, forma della gabbia, tipo di lubrificante; quindi la caratteristica sonora cambia da cuscinetto a cuscinetto. Ci sono però dei punti comuni a tutti i cuscinetti: con il deterioramento delle condizioni di

Supponendo una rugosità superficiale di RMS di 0,2 micron lo spessore minimo del film di lubrificazione per il rullo nella corsa è di 1 micron, quello per il rullo nella gabbia è di 10 micron. Man mano che si verifica la carenza di lubrificazione lo spessore diminuirà

lubrificazione aumenta l'energia di sollecitazione, l'energia da stress di lubrificazione è a banda larga, ad alta frequenza e casuale.

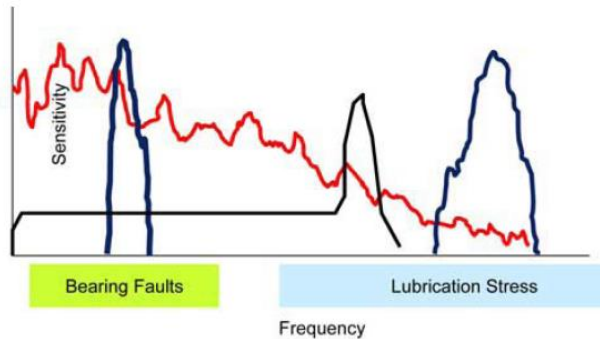


Figura 16 Confronto di diversi tipi di sensori

Quando si monitorano i guasti di lubrificazione, la selezione del sensore è fondamentale. Il sensore rosso a banda larga in figura non rappresenta una buona scelta perché i suoni ad alta frequenza verrebbero “soffocati” da quelli a bassa frequenza. Il sensore blu a banda

stretta nell'area di guasto del cuscinetto perderebbe completamente qualsiasi rumore di sollecitazione del lubrificante. Il sensore a banda larga nero rappresenta il classico accelerometro, potrebbe avere una risposta nel campo della lubrificazione, ma le tecniche di montaggio sono fondamentali e ne impediscono un corretto funzionamento. In fine, il sensore blu a banda stretta lubrificazione ha una buona sensibilità e si isola completamente dal rumore a bassa frequenza.

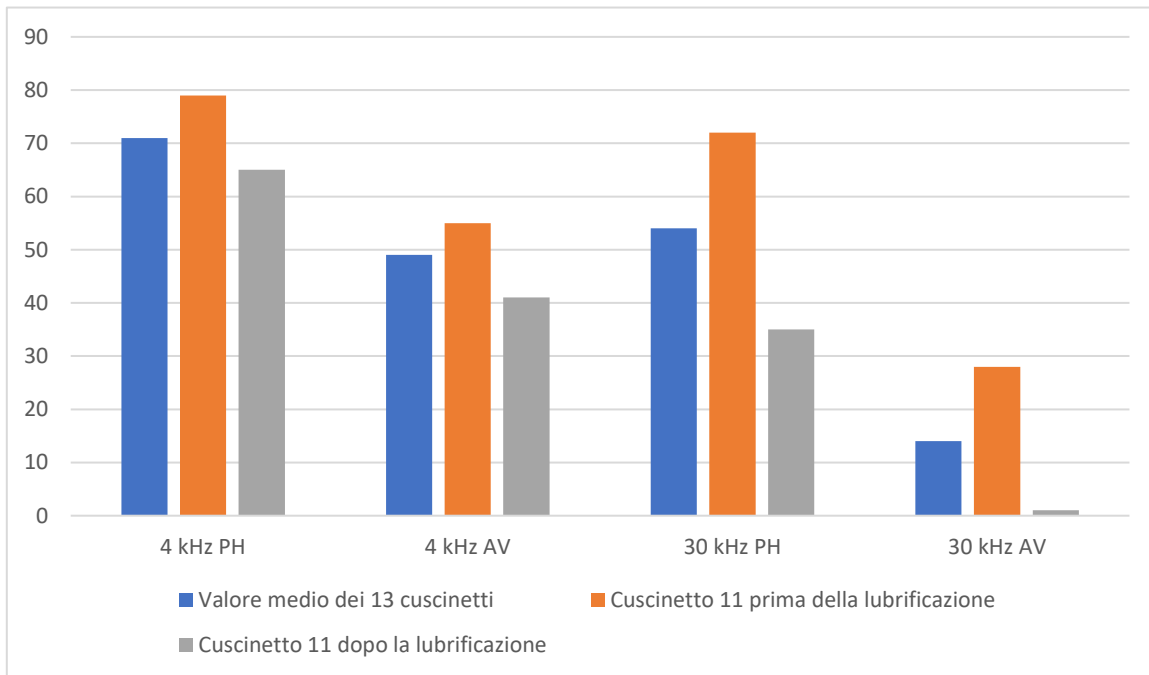
Le tecnologie che potrebbero essere utilizzate per identificare e monitorare i guasti di lubrificazione sono la termografia a infrarossi, l'ascolto mediante un accelerometro, l'analisi ad ultrasuoni e l'analisi delle vibrazioni. La termografia a infrarossi è utile per rilevare possibili problemi di lubrificazione in fase avanzata ma non per rilevare problemi in fase precoce. Inoltre, saranno necessarie ulteriori tecnologie per confermare la fonte della firma anomala della temperatura. Alcuni analizzatori di vibrazioni hanno un'uscita audio per ascoltare l'uscita dell'accelerometro e quindi il rumore interno al cuscinetto. Il monitoraggio ad ultrasuoni fornisce sia capacità di ascolto che misurazioni quantitative. Il suono

viene eterogeneo nella nostra gamma di ascolto e vengono misurati parametri sonori specifici. Il dispositivo isola le frequenze più alte e filtra tutto il rumore alle frequenze più basse, se utilizza un sensore a banda stretta o un sensore risonante il montaggio è molto più semplice rispetto a un accelerometro. L'analisi delle vibrazioni tradizionale analizza le macrovibrazioni e si concentra sugli eventi a bassa frequenza. La misurazione CSI PeakVue è un metodo avanzato di elaborazione del segnale che esegue un'analisi di microvibrazione misurando il movimento microscopico all'interno del corpo. Analizza l'energia al di sopra dell'intervallo di analisi convenzionale ma non essendo un processo di media acquisisce i valori di ampiezza di picco reali dalle informazioni ad alta frequenza. La misurazione PeakVue consiste nel creare la forma d'onda del tempo tramite il campionamento dei dati raccolti infatti vengono presi solo i picchi e che creano la forma d'onda necessaria. Siccome però la natura dei guasti di lubrificazione rende i dati difficili da decifrare si applica la tecnica CSI di decifrazione del segnale grazie alla quale si rimuovono tutte le attività casuali nel dominio del tempo.

Analisi di cuscinetti

Analizziamo ora tredici cuscinetti di un nastro trasportatore di un'industria alimentare. La maggior parte dei cuscinetti veniva lavata frequentemente a pressione con acqua e ingrassata, il cuscinetto numero 11 però essendo in una posizione scomoda da raggiungere apparentemente non veniva ingrassato nella maniera corretta. Ogni cuscinetto è stato testato tre volte prima della lubrificazione e tre volte dopo. Di tutti i cuscinetti lubrificati quotidianamente, solo l'undicesimo è

stato influenzato positivamente dalla lubrificazione supplementare.



Il grafico mostra un riepilogo delle letture effettuate nelle gamme di frequenza 4 kHz e 30 kHz e le letture di picco (PH) e medie (AV) ad ogni frequenza. La prima colonna mostra la lettura in dB media di tutti e tredici i cuscinetti, la seconda invece dell'undicesimo cuscinetto prima della lubrificazione e la terza del cuscinetto dopo la lubrificazione. Il cambiamento più significativo si è verificato con la lettura media di 30 kHz, quindi in questo test questa frequenza era il parametro più sensibile per misurare le condizioni di lubrificazione.

Analisi di motori elettrici generici da 450 HP

I motori in esame funzionano a 1.780 giri/min e azionano dei soffianti, i motori

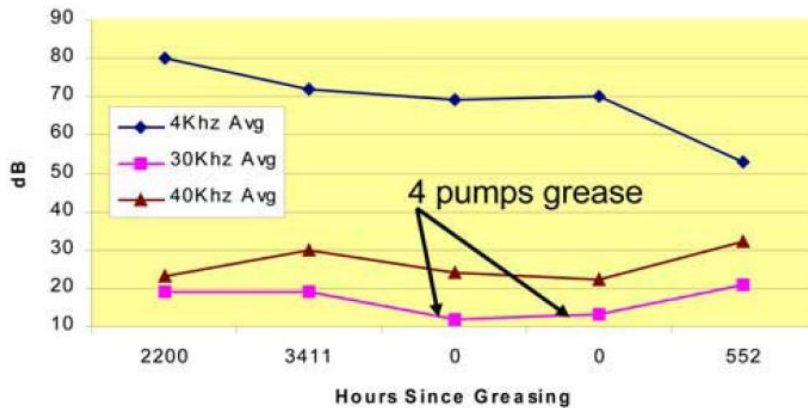


Figura 17 Livelli sonori del motore

vengono lubrificati ogni 3.500 ore. In figura si mostrano i livelli sonori di lubrificazione in base al numero di ore sul motore dalla lubrificazione. A 3.411 ore il cuscinetto è stato

ingrassato. Con le letture a 30 kHz i livelli sonori sono diminuiti in modo significativo ma quando è stato aggiunto lubrificante sono aumentati leggermente, per questo motivo la lubrificazione è stata interrotta.

Analizzando la lubrificazione di altri cuscinetti possiamo riassumere che:

- in tutti i cuscinetti la lettura media a 30 kHz ha fornito letture più prevedibili
- la lubrificazione non ha influito sulle letture a 4 kHz che però può essere utile per analizzare le condizioni meccaniche del cuscinetto
- per tutti i cuscinetti testati i livelli di lubrificazione ottimali sono di circa 10 dB, i normali livelli di lubrificazione operativa sono compresi tra i 10 e i 20 dB. Per i cuscinetti dei banchi di prova e dei nastri trasportatori il livello critico prima che si verificasse un danno permanente è di 30 dB. Queste stime sono però riferite solo ai casi analizzati, bisogna analizzare ogni caso per trovare i dati precisi

- tutti i test sui cuscinetti non hanno mostrato un ciclo di lubrificazione standard, tranne che per il fatto che l'aumento delle ore comporta un aumento dei livelli sonori e che la rilubrificazione ha portato a una diminuzione

Conclusioni

Il concetto di manutenzione, inteso come singolo intervento su di una macchina o un'attrezzatura, è oggi superato: l'attività di manutenzione negli impianti industriali viene infatti considerata come un "sistema", dal momento che coinvolge tutti i processi lavorativi e organizzativi e si integra con essi per garantire la massima affidabilità in ogni fase della lavorazione.

Il costo di gestione della manutenzione di un impianto industriale ha un peso importante nelle voci di bilancio, soprattutto in realtà complesse e strutturate; per questo motivo gestire con attenzione questo aspetto può portare a un risparmio sensibile.

Nell'ottica di ridurre i costi di esercizio si sono recentemente sviluppate discipline dedicate che si occupano dell'analisi e del miglioramento continuo della manutenzione: la scelta delle giuste strategie manutentive segue precise logiche, derivanti dalla conoscenza approfondita degli impianti, dall'analisi dei guasti e da valutazioni di carattere economico sul costo del ciclo di vita dei beni aziendali.

È necessario comunque un continuo studio e sviluppo delle tecniche manutentive, con conseguente impegno da parte sia degli investitori che devono investire soldi sia dei manutentori che si devono aggiornare e migliorare continuamente, in modo da rendere sempre più efficiente il sistema di produzione aziendale.

Bibliografia e sitografia

- AA. VV., *Il manuale del manutentore meccanico*
- Angeli F., *Manuale di manutenzione degli impianti industriali e servizi*
- Arnold P. V., *Harley-Davidson Plant Excels with Proactive and Predictive Maintenance*
- D'Incognito V., *Progettare il sistema di manutenzione*
- Di Sivo M., *Il progetto di manutenzione*
- FEMP, *Operations & Maintenance Best Practices*
- Fore G., *Predictive Maintenance Case Study*
- Harp M., *Condition Monitoring on Drilling Platforms: A Case Study*
- Lewis B. T., *Facility manager's operation and maintenance handbool*