

# ***Vibro-acoustic condition monitoring of IC engines: a review of the existing techniques***

**S. Delvecchio (\*), P. Bonfiglio (\*\*), F. Pompoli (\*\*)**

(\*) Siemens Industry Software s.r.l,  
Viale Pietro ed Alberto Pirelli 10, I-20126, Milano, Italy

(\*\*) Engineering Department in Ferrara, Università degli Studi di Ferrara  
Via Saragat 1, I-44122 Ferrara, Italy.

Corresponding Author:

Simone Delvecchio  
Siemens Industry Software s.r.l,  
Viale Pietro ed Alberto Pirelli 10, I-20126, Milano, Italy  
email: [simonedelvecchio.nvh@gmail.com](mailto:simonedelvecchio.nvh@gmail.com)  
tel: +39 3397852285

## **Contents**

1. Introduction
2. Sound and vibration generation mechanisms in Internal Combustion Engines (ICE)
3. Vibration and AE signal-based methodologies and techniques
4. Acoustic signal-based techniques
5. Critical discussion
6. Concluding remarks

## **Abstract**

This paper deals with the state of art of strategies and techniques based on vibro-acoustic signals that can be able to monitor and diagnose malfunctions in Internal Combustion Engines (ICE) during both test bench and vehicle operational conditions. During last decades several authors have summarized knowledge on critical reviews mainly focused on rotating machines in general or specific signal processing techniques: no attempts to deal with IC engine condition monitoring have been carried out. This paper first gives a brief summary of the sound and vibration generation in ICE in order to place the further discussion on fault vibro-acoustic diagnosis in context. Then, an overview of the monitoring and diagnostic techniques described in literature using both vibration and acoustic signals has been given. Different faulty conditions are described affecting combustion, mechanics and aerodynamics of ICE. The importance of measuring acoustic signals, more than vibration ones, is due since they seem more suitable to be implemented in on-board monitoring system in view of their non-intrusive behavior, capability in simultaneously capturing signatures of several mechanical components and because of the chance to detect faults affecting the airborne path transmission.

The present review can be considered as a useful guideline for manufacturers in understanding which types of fault can be diagnosed by using vibro-acoustic signals by sufficient time in both test bench and driving condition and which signal processing technique could be considered the most reliable and informative to be implemented for the fault in hand.

## 1. Introduction

Fault detection and diagnosis of I.C. engines (ICE) are not simple tasks due to the complexity of the engine. Both detection and diagnosis activities could be performed using different strategies depending on the operational condition: test bench or vehicle (VICE, i.e. vehicle with internal combustion engines) driving operations. During test-bench operations information about the status of the engine could be obtained by using (in order of priority) performance analysis, oil analysis, visual inspection, vibration analysis and acoustic analysis. During vehicle driving operations it could be a good strategy to monitor the ICE before losing performances or reaching a mechanical failure. For this purpose vibration and acoustic analysis represent informative and powerful tools to reveal faults at early stage. Even vibration and acoustics of reciprocating machinery such as internal combustion engines, compressors and pumps is more complex and difficult to analyze, in the last few years the number of attempts to define signal processing strategies for condition monitoring is increased not only for the grown of the computing calculation power but for the assesment of powerful signal processing techniques, i.e. cyclostationary [1], and for the recent attempt of the manufacturers in assembling cold tests at the end of assembly line [2][3][4].

The essential difference between cold and hot tests is that the hot test aims at verifying the engine performance, while the cold test aims at verifying the anomalies by means of torque, pressure, vibration and acoustic measurements. In addition to cold test measurements one actual challenge of the manufacturers is to apply condition monitoring strategies during vehicle driving operation. This consists in monitoring the status of ICE at different points of life (stepped by the number of kilometers or years of life) in order to detect faults at early stage and advise the user to make a maintenance control before the failure appearing and/or loose of vehicle performances. In this context the acoustic signals could be an advantage with respect of vibration ones since their non-intrusively behavior, the possibility to capture superimposed signals from more than one component and the chance to detect faults affecting the air-borne path transmission.

Still for vehicle driving operations the monitoring procedure involves:

- the acquisition of signals by means of appropriate sensors. Because of the critical selection of the acquisition parameters, the data acquisition step is not of minor importance.
- several post-processing operations, like correct selection of time histories, averaging and digital filtering in order to separate the useful part of the signal from the noise (electrical and mechanical), which is often present in the vehicle environment;
- implementation of signal processing techniques by taking into account the characteristics of the signal and the type of machine/mechanical component from which the signal is being measured (i.e. rotating or alternative machine with simple or complex mechanisms);
- extraction of several features that have to be extracted in order to assess the physical state of the machine or to detect some incipient defects and to determine the causes of their presence.

The purpose of this study is to review this entire monitoring procedure based on vibro-acoustic experimental studies that have been carried out in literature.

Several existing reviews on condition monitoring, fault diagnosis and prognostics treats generically rotating machines [5][6][7][8]. In particular [8] represents an advance in treating prognostic techniques for non-stationary and non-linear rotating system. On the other hand some critical resumes have been focused on the different capabilities in diagnostic procedure of specific signal processing techniques [9][10][11]. In

addition [12] represents the first interesting attempt to review both vibration and acoustic signal processing confirming that the acoustic signal is still less used than vibration one for diagnostic purposes. Concerning ICE engines an interesting review is carried out in [13] where N.B. Jones collects common faults, fault mechanisms and their effects on engine performances describing several diagnostics methods based on wear analysis, pressure, temperature and emissions rather than vibro-acoustic signal.

Firstly, the study begins with presenting a review of the main sources of higher noise and vibration in Internal Combustion Engines (ICE). This introduction can be considered an useful description to understand which source, in case of malfunction, can alter the mechanism of generation of noise and how the alteration happens. This analysis gives some preliminary information on how to properly measure the vibro-acoustic signals on ICE.

Secondly diagnostic methodologies and techniques mainly based on vibration (and Acoustic Emission (AE)) signals are reviewed and discussed in Section 3 with particular application to ICE. One of the goal of the section is to evaluate which vibration techniques could be also adapted to acoustic signals.

The state of art of acoustic diagnostic techniques is more deeply investigate in Section 4.

Finally a critical discussion and concluding remarks are given.

## **2. Sound and vibration generation mechanisms in Internal Combustion Engine (ICE)**

The noise generation in Internal Combustion Engines (ICE) is given by aerodynamic and mechanical sources [14][15][16]. A aerodynamically source could be defined as a source of noised caused by an air perturbation: turbulence phenomena within the exhaust and intake ducts can be considered as aerodynamic sources. A mechanical source generate noise through contacts, vibration, impacts and shocks of/between surfaces i.e. impacts between cylinder and piston, shafts and supports, gear vibration, chain/belt vibration, duct flow-induced vibration.

The transmission of both noise source types, aerodynamically and mechanical can be classified in: air-borne, structure born or mixture of them.

Concerning the air-borne transmission the acoustic wave I directly transferred from the source to receiver through the air medium. The structure-born transmission the acoustic source travels around structural parts before being transmitted to the receiver. In case of a mixture the acoustic source is simultainly transmitted in both structural and airborne ways.

The source transmitted by airborne can reach directly the receiver otherwise can make surface vibrating. The source transmitted by structure-borne can reach the receiver through vibrating surfaces. If these surfaces have relevant irradiating power can generate noise.

Figure 1 depicts the model 'source (aerodynamic, mechanical)-path(structure-borne, airborne)-receiver'.

The same model is well exploited for a gear case in [17] by Sanzebacher et at. in case of mechanical source.

The noise emitted by an ICE engine is composed of many components emitted from different sources (Figure 2). These sources include combustion noise, mechanical noise, and aerodynamic noise [18] [19]. Table 1 briefly summarizes ICE engine noise excitation forces, their generation mechanisms and noise transmission paths. Especially in diesel engines the combustion noise is produced by the rapid rate of increase of cylinder pressure, which besides being a source of engine structural vibrations but also of air-borne noise within the vehicle interior. Li et al. [20] confirm that the most fundamental source in diesel engines is the combustion-induced noise. It occurs towards the end of the compression stroke and

subsequent expansion stroke. The rapid pressure change due to the combustion transmits through engine structures and forms a part of the airborne noise. This pressure change also causes the vibration of the engine components such as the cylinder head, pistons, connecting rods and engine body. The vibration of these components then provides another part of the overall engine noise. Together these noise sources account for over 80% of total engine noise. The combustion-induced noise is however the dominant source. The transfer function of engine's combustion noise can be obtained through experimental method by Gequn [21]. Other noise sources are due to engine functions such as the injection of fuel and the operation of inlet and exhaust valves. These sources usually produce low level noise and make up a fraction of the overall noise. The combustion noise and the aerodynamical noise have been studied by Kaminski [22] and Ihe al. [23]. Kamiński applies the nonlinear multidimensional methods which can distinguish random variations from a deterministic behavior for internal pressure signals. Ihe predicts insertion loss (IL) and radiated sound pressure level (SPL) of the automotive for the fixed rpm and engine run-up condition. It was suggested that, for the purpose of approximate calculation of the overall trend of IL or radiated SPL of the intake system, anechoic source model and measured source impedance together with a cold engine condition could be good solutions.

Although the above engine mechanical and combustion noise sources have distinctive time instances, it is still difficult to resolve them accurately based on noise measurement. This is because the occurrences of each noise source are too close together. Several methods have already developed to separate mechanical from combustion noise in time ([24][25]) and frequency [26][27] domain.

After analyzing the main source of noise of an ICE and their transmission paths to the driver it has to be discussed what happens in faulty conditions. In order to study the typical anomalies it is convenient to consider the ICE in different sub-components:

- injection system;
- lubrication system;
- pistons;
- ring and gaskets;
- distribution system;
- intake and discharge lines;
- bearings;
- turbocharger;
- intercooler;
- auxiliaries (heat exchanger, alternator, torsional damper, conditioned air compressor, ECU).

In Table 2 typical anomalies in ICE have been summarized. Faulty condition affecting the vehicle interior comfort have been underlined.

- ICE → Misfiring and knock involve the combustion source. As it can be seen from Table 1 the combustion noise could be transmitted to interior vehicle by both airborne and structure-borne path (engine block vibration)
- ICE → Piston slap, piston clearances, clearance within cam-distribution system, loosing in exhaust/intake manifold, loosing chain belts, distributed wear in bearing, localized faults in rolling elements could be considered mechanical sources. As reported in Table 1 the mechanical sources

can be transmitted to vehicle interior by both airborne and structure-borne path: engine block vibration and acoustic radiation from cam distribution cover;

- ICE → Intake/exhaust manifold losses involve the aerodynamical source transmitted to vehicle interior by airborne path;
- Transmissions → faulty gear and transmission shaft transmit vibration by structural borne path irradiating noise by gear train case;
- Lubrication system → faulty oil pump typically transmits to oil cup by dynamic coupling between oil cap and oil.
- ICE sub-component → faulty ventilation fan, it can be treated like an aerodynamical source transmitted to vehicle interior by airborne path.
- ICE sub-component: turbocharger → faulty blade. It deals again with aerodynamical source transmitted to vehicle interior by airborne path.
- ICE sub-component: turbocharger → turboshaft unbalance. It is a mechanical source with structural transmission to compressor case through bearings.
- ICE sub-component: alternator → whistle noise. It is an aerodynamical source that can interact with the system resonance. Usually it is transmitted by airborne.

### 3. Vibration and AE signal-based methodologies and techniques

Il presente paragrafo illustra lo stato dell'arte sulle metodologie di monitoraggio e diagnostica in un veicolo con motore a combustione interna (VICE). Vengono descritte le principali metodologie (Sezione 3.1) utilizzate da un sistema di monitoraggio e diagnostica e quali tecniche di analisi del segnale (Sezione 3.2) utilizzate con particolare applicazione al ICE. Per la descrizione delle metodologie vengono trattati qui principalmente segnali di vibrazione ed emissione acustica (AE).

Gli obiettivi sono:

- individuare quali caratteristiche dei segnali di vibrazione sono anche estendibili ai segnali acustici;
- analizzare l'ampia gamma di difetti diagnosticabili attraverso l'analisi del segnale di vibrazione.

Vengono inoltre forniti alcuni cenni teorici delle tecniche di analisi del segnale descritte.

#### 3.1 Methodologies

Come è ben noto, guasti meccanici in macchine spesso mostrano la presenza tramite segnali anomali di vibrazione, quindi tecniche di monitoraggio delle condizioni di componenti meccanici basati sull'analisi di questi segnali sono presenti in letteratura [28] - [35]. La maggior parte degli studi sono stati effettuati su semplici parti meccaniche, quali ingranaggi e cuscinetti volventi, aventi caratteristiche dinamiche ben determinate. Pertanto il monitoraggio degli ingranaggi e dei cuscinetti volventi utilizzando le 'firme' vibratorie di queste macchine sono ampiamente riportati [36]-[42]. Mentre i cuscinetti possono essere considerati come componenti motore (ICE), gli ingranaggi possono essere intesi come parti della trasmissione e quindi del veicolo (VICE). La firma vibro-acustica di una macchina alternativa quale ICE, compressori e pompe è molto più complessa e difficile da analizzare rispetto ai cuscinetti e agli ingranaggi.

In generale, il rilevamento dei guasti e la diagnosi di difetti nelle macchine e, quindi, in ICE possono essere effettuati utilizzando due diverse strategie.

Una prima strategia di monitoraggio e diagnostica consiste nel modellare l'intero sistema meccanico utilizzando metodi agli elementi finiti o a parametri concentrati validati sperimentalmente. L'idea è quella di simulare attraverso il modello potenziali anomalie ed ottenere quindi una risposta vibro-acustica del sistema in condizioni sia sane che difettose. La risposta così ottenuta viene confrontata con quella del sistema reale attraverso un algoritmo decisionale che effettua così la diagnosi del sistema reale.

Una seconda strategia di monitoraggio e diagnostica consiste nell'applicare tecniche di analisi del segnale puramente rilevato sperimentalmente su componente reale per ottenere parametri numerici o grafici bi-dimensionali che possono essere trattati da un algoritmo decisionale per rilevare la presenza del difetto ed effettuare la diagnostica.

Riguardo alla prima strategia, la maggior parte dei lavori presenti in letteratura si riferiscono ad analisi condotte su motori testati su banchi prova a caldo. Kimmich propone un metodo di diagnosi basato su un modello dei sistemi di aspirazione e di iniezione [43]. Dati sperimentali rilevati on-board dalla centralina del motore vengono confrontati con il modello ed, in caso di differenze, viene avviato il processo di diagnosi attraverso logica fuzzy. Chen e Randall [44] utilizzano modelli del ICE (validati sperimentalmente) per simulare difetti meccanici e di combustione con l'obiettivo di addestrare reti neurali utili per la diagnostica automatica. In [45] Azzoni sviluppa un modello numerico di un ICE per fini diagnostici concentrandosi in particolare sul comportamento del collettore d'aspirazione e sulla dinamica rotativa dell'albero motore. Vengono infatti trattati in particolare la mancata accensione di un cilindro (misfiring) e la diagnosi della valvola del canister. Nel caso del difetto del misfire Azzoni ha sviluppato metodi essenzialmente rivolti alla diagnosi per motori ad elevate prestazioni ed in condizioni in cui è piuttosto arduo effettuare una corretta rilevazione dei fenomeni attraverso metodi basati sull'analisi armonica della velocità istantanea dell'albero motore nel ciclo motore. Per la diagnosi della valvola del canister (valvola che impedisce ai vapori di benzina che si formano nel serbatoio e nell'impianto di iniezione di scaricarsi nell'atmosfera) ha utilizzato invece il segnale di pressione misurato all'interno del collettore di aspirazione. In [46] viene simulato un sistema rotore-cuscinetti le cui risposte vibratorie vengono analizzate con tecniche non-stazionarie di analisi del segnale. Le features ottenute attraverso tali tecniche vengono utilizzate da un algoritmo decisionale per la diagnosi basato sulla logica del Support Vector Machine (SVM).

La seconda strategia si basa esclusivamente sull'analisi sperimentale della grandezza fisica senza l'ausilio di un modello numerico. In particolare, per quanto riguarda l'analisi vibro-acustica, il sistema meccanico viene completamente caratterizzato da quella che viene detta firma vibro-acustica del sistema che non è altro che un segnale rilevato in determinate condizioni operative e di funzionamento del sistema meccanico. Lo scopo di un sistema di monitoraggio è quello di utilizzare l'informazione estratta dalla firma per individuare la presenza di anomalie o definire lo stato di salute del sistema. Un'alterazione della firma vibro-acustica non solo indica un cambiamento nello stato della macchina ma può inoltre fornire indicazioni sulla causa dell'anomalia.

E' possibile quindi definire il monitoraggio come la valutazione dello stato della macchina e la rivelazione della presenza dell'eventuale anomalia. Con il termine diagnostica invece si definisce l'identificazione del componente o processo che causa la deviazione della macchina dal suo normale stato di salute.

Un sistema di monitoraggio affidabile deve rilevare dalla firma del sistema un'informazione robusta e non ridondante (feature) che possa essere trattata come input da un algoritmo decisionale che effettua sia l'attività di monitoraggio che di diagnostica. Tale procedura viene schematizzata in Figura 3.

A causa del carattere non intrusivo l'analisi del segnale di vibrazione è ampiamente utilizzata dai produttori per diagnosticare un' ampia gamma di difetti meccanici. Inoltre l'incremento delle potenzialità computazionali ha favorito negli ultimi anni l'impiego e lo sviluppo di tecniche avanzate di analisi del segnale.

La procedura di monitoraggio e diagnostica coinvolge in prima istanza la scelta delle condizioni di acquisizione del segnale.

Le tecniche di analisi del segnale devono essere implementate tenendo conto delle caratteristiche del segnale ed il tipo di macchina sulla quale il segnale viene misurato (macchine rotante o alternativa, semplice o complessa). Quando le tecniche di analisi del segnale vengono applicate direttamente al segnale rilevato sperimentalmente si parla di tecniche **non parametriche**. Quando invece si è in grado di costruire un modello che genera un segnale simile a quello osservato si parla di **tecnica parametrica**. Tecniche di analisi del segnale non parametriche si differiscono nel modo con cui modellano il segnale (es. ARMA, Auto-Regressive Moving Average) e sono molto utilizzate quando è necessaria un'elevata riduzione dei dati. Bastano infatti solo i parametri del modello a determinare le caratteristiche temporali/frequenziali di un segnale arbitrario. Nonostante questo le tecniche parametriche non sono ampiamente utilizzate per sistemi di monitoraggio in ICE/VICE.

Una possibile classificazione riguardante le analisi del segnale **non parametriche** si basa sui **domini** di analisi del segnale (angolare, frequenziale, cepstrale, ciclico, tempo-frequenziale). La scelta del dominio di analisi dipende:

- dal tipo di segnale analizzato;
- da quale dominio permette l'ottenimento di features maggiormente informative da essere trattate dall'algoritmo decisionale.

Le features (informazioni significative) vengono estratte attraverso l'analisi del segnale per poter identificare eventuale anomalie presenti ed, in caso positivo, determinare la causa della loro presenza. Tali informazioni possono essere parametri o grafici bi-dimensionali.

In Table 3 vengono classificate le strategie di monitoraggio e diagnostica, le relative tecniche di analisi del segnale classificate sul tipo di dominio di analisi e vengono indicati gli algoritmi decisionali maggiormente utilizzati.

La scelta del tipo di analisi del segnale viene spesso effettuata considerando le caratteristiche temporali del segnale (Table 4). I fondamenti teorici e la descrizione delle tecniche utilizzate per ciascun dominio viene trattata nella Sezione 3.2.

Riguardo alla seconda strategia di monitoraggio ed ai metodi non parametrici applicati ai VMCI Hugh Thomas tratta un metodo diagnostico per rilevare la detonazione attraverso l'algoritmo decisionale di pattern recognition che utilizza gli output forniti da un'analisi wavelet [47].

Molinaro invece utilizza come input di algoritmi di pattern recognition alcuni parametri derivanti da un'analisi del cepstrum del segnale temporale di vibrazione sempre al fine di migliorare il rilevamento della detonazione [48].

Klinkcheaeam utilizza un'analisi statistica del segnale di vibrazione nel dominio angolare per rilevare la presenza di giochi tra valvola e punteria e tra candela e testa motore [49]. Tali difetti, pur essendo di tipo meccanico, hanno effetti sulla qualità della combustione.

Per identificare problemi di mancata accensione cilindro S. Babu Devasenapati utilizza una semplice analisi statistica nel dominio del tempo. In [50] si concentra anche sull'ottimizzazione dell'algoritmo decisionale.

Anche Tse ha studiato la presenza di giochi tra valvola e punteria ed anche tra pistone e cilindro (in presenza di anello di tenuta usurato) attraverso l'analisi del segnale di vibrazione nel dominio angolare [51]. Per la separazione degli eventi impulsivi dovuti agli impatti dei meccanismi con gioco ha utilizzato la tecnica dell' Empirical Mode Decomposition. Si tratta di un filtro passa-basso adattivo che permette di scomporre il segnale angolare in diverse componenti ottenute attraverso l'operazione di filtraggio adattivo. Questa separazione di componenti permette di evidenziare meglio gli eventi impulsivi, associarli agli eventi notevoli del motore per poter identificare il componente che presenta gioco.

Ancora nell'ottica di scomposizione del segnale Li et al. utilizzano la tecnica Independent Component Analysis (ICA) per poter decomporre i segnali di vibrazione rilevati in un numero di componenti indipendenti e non correlate tra loro e, di conseguenza, studiare separatamente ogni singola componente [52]. In diversi lavori Delvecchio e Niculita affrontano l'analisi di difettologie meccanici durante procedure di controllo qualità in motori trascinati (non accesi) attraverso la trasformazione del segnale temporale in pattern simmetrizzati - Symmetrized Dot Pattern (SDP) - per la caratterizzazione visiva dei segnali di vibrazione e per l'ottenimento di valori di soglia utili per discriminare la condizione difettosa da quella sana [53][59].

In [60] Tomaszewski utilizza un'analisi puramente nel dominio delle frequenza per diagnosticare difetti di combustione. Dopo aver identificato i punti di misura della vibrazione maggiormente informativi individua le frequenze caratteristiche legate alla combustione testando il motore prima in condizioni normali e successivamente senza l'accensione dei cilindri.

Antoni et al. [61][62] e Konig [63] hanno proposto una metodologia basata sulle proprietà di ciclostazionarietà del segnale applicata a difetti di combustione: anticipo e ritardo di iniezioni, mancata accensione cilindro e detonazione.

L'applicazione di tecniche di analisi tempo-frequenza, particolarmente adatta per l'analisi di segnali non stazionari viene ampiamente applicata al monitoraggio del ICE. Tecniche quali Short-Time Fourier Transform (STFT), Distribuzione di Wigner-Ville (WVD) e Wavelet Continuous Transform (CWT) vengono principalmente utilizzate per distinguere le condizioni difettose da quelli normali attraverso una procedura di monitoraggio 'visiva' dei guasti basata sul confronto di grafici bi-dimensionali e non sull'ottenimento di singoli parametri [64][65][66][67]. In particolare, Liu e Ling [68] hanno proposto un metodo per l'ottimizzazione della tecnica CWT applicata a segnali di vibrazione. In [69] Vulli propone STFT e CWT per l'identificazione di istanti di iniezione, eventi valvole e presenza detonazione. Bardou utilizza STFT applicata al segnale di vibrazione per il monitoraggio di perdite nei condotti di aspirazione e scarico [70].

Per quanto concerne i metodi non parametrici è possibile affermare che l'analisi di vibrazione viene principalmente utilizzata per diagnosticare difetti di combustione a causa del fatto che la combustione stessa domina la risposta vibratoria del ICE, specialmente nei motori diesel.

Delvecchio ed altri [71] - [76] hanno studiato per la prima volta il monitoraggio e la diagnostica, in motori trascinati, di soli difetti meccanici attraverso il segnale di vibrazione. In particolare l'analisi diagnostica viene svolta attraverso tecniche di analisi tempo-frequenza e ciclostazionarie. Recentemente anche Bregant [77] si è occupato di studiare soli difetti meccanici attraverso il calcolo della metrica 'Engine Envelope' basata, anch'essa, sulle proprietà ciclostazionarie del segnale di vibrazione acquisito sul basamento del motore.

Un esempio di applicazione di metodi parametrici è il lavoro di Etefagh [78] che studia la presenza di detonazione modellando il segnale di vibrazione rilevato sulla testa cilindri utilizzando la tecnica ARMA.

Recentemente oltre al segnale di vibrazione viene sempre più frequentemente utilizzato il segnale di Emissione Acustica (AE) per scopi di monitoraggio e diagnostica [79][80][81]. Il segnale di AE viene rilevato da dispositivi risonanti sensibili ai rilasci di energia sotto forma di onde elastiche che vengono captate sulla superficie del motore in prova. Le frequenze che normalmente si rilevano sono tra 100 e 300 kHz.

Altri approcci di monitoraggio e diagnostica utilizzano il segnale di velocità istantanea dell'albero motore per diagnosticare difetti di combustione [82][83][84][85][86].

### 3.2 Techniques

La scelta delle tecniche di analisi del segnale da adottare in un sistema di monitoraggio e diagnostica deve essere guidata dai seguenti quesiti:

- qual è la natura del segnale rilevata: presenta periodicità o è casuale? È stazionaria o non stazionaria?
- quali tecniche possono essere utilizzate condizionatamente alla natura del segnale? Qual è il dominio di studio più corretto?
- quali informazioni possono essere estratte dal segnale attraverso l'uso di ogni tecnica? Quanto sono efficaci le tecniche scelte?

Supposto quindi che il tipo di segnale da analizzare ha un'influenza sul tipo di analisi da effettuare, è di rilevante importanza esaminare i vari tipi di segnale che si incontrano nella pratica.

I segnali casuali sono stati descritti matematicamente utilizzando la teoria della probabilità, delle variabili casuali e dei processi stocastici [87][88].

Una tipica classificazione dei segnali è la seguente [89][90]:

- segnali stazionari;
- segnali non stazionari.

I segnali stazionari sono caratterizzati da proprietà medie tempo-invarianti e quindi indipendenti dal particolare istante in cui si effettua la loro registrazione. Questo vale sia per i segnali deterministici che per i segnali casuali. In particolare, un segnale casuale viene chiamato stazionario in senso lato se i momenti statistici del primo (media) e del secondo (covarianza) ordine sono indipendenti dal tempo. Se tutti i momenti (o cumulanti) statistici sono indipendenti dal tempo, allora il segnale casuale è stazionario in stretto senso. Poiché un segnale casuale non stazionario è un segnale la cui struttura statistica varia in

funzione del tempo, può essere definito come un segnale che soddisfa una non-proprietà, la proprietà di non-stazionarietà. I segnali non stazionari possono essere suddivisi in segnali non stazionari continui e segnali transitori. Questi ultimi possiedono ampiezza nulla all'istante iniziale e all'istante finale. Segnali tipici durante rampe in salita o in discesa del motore sono segnali non stazionari continui e vengono, come si vedrà in seguito, tipicamente trattati attraverso tecniche tempo-frequenza.

È interessante osservare un'altra classe particolare di segnali non stazionari che comprende i cosiddetti segnali ciclostazionari, recentemente affrontati da Antoni nel campo del monitoraggio delle macchine rotanti [91]. Le misure effettuate su una banda ad alta frequenza forniscono un segnale composto da una parte periodica e da una parte casuale. I recenti studi di Antoni hanno dimostrato che entrambe le parti contengono informazioni diagnostiche. La parte casuale, pur avendo una media nulla all'interno di un ciclo (per esempio il ciclo motore composto da due giri dell'albero motore), ha in realtà una componente periodica. Ecco perché per i segnali ciclostazionari si parla di dominio ciclico. Tali segnali, che sono non stazionari all'interno del ciclo e stazionari lungo diversi cicli sono vengono chiamati segnali ciclostazionari. Antoni ha dimostrato che per analizzare i segnali ciclostazionari è necessario applicare una trasformazione non lineare sul segnale che riesce a porre in evidenza la sua periodicità nascosta. Varie trasformazioni (filtraggio, finestrate, etc.) possono essere applicate al segnale prima della trasformazione non lineare.

L'analisi di segnali stazionari è ampiamente basata su tecniche nel dominio del tempo e sull'analisi di Fourier, che individua le componenti di frequenza costitutive all'interno dei segnali. In particolare la serie di Fourier è utile per analizzare segnali periodici. Tipicamente misure a bassa frequenza sono essenzialmente periodiche in natura. Tipici esempi di segnali periodici in ICE sono coppia istantanea, pressione e velocità istantanea dell'albero motore. I segnali periodici sono perfettamente descritti da un (piccolo) insieme numerabile di coefficienti di Fourier che quindi forniscono un insieme di informazioni ridotte rispetto al segnale originale nel dominio del tempo.

Sebbene la trasformata di Fourier può essere utilizzata per analizzare segnali con impulsi periodici (che generano armoniche distanziate e bande laterali), risulta inefficace nel valutare il comportamento dipendente dal tempo delle componenti in frequenza.

Al contrario, le tecniche tempo-frequenza trasformano il segnale temporale unidimensionale in un piano bidimensionale esprimendo le variazioni temporali delle frequenze caratteristiche nel segnale. Tali tecniche risultano quindi uno strumento valido ed efficace per l'analisi del segnale non stazionario che la trasformata di Fourier non è in grado di analizzare. Oltre alla classica Short Time Fourier Transform (STFT) - che presenta una risoluzione uniforme in entrambi i domini del tempo e della frequenza - altre tecniche di analisi tempo-frequenza, quali la Trasformata Wavelet Continua (CWT), Discrete Wavelet Transform (DWT) e Wigner Ville Distribution (WVD) vengono applicate per scopi diagnostici.

Il segnale nel **dominio del tempo** contiene un numero elevatissimo di informazioni. Già un'ispezione visiva delle porzioni del segnale temporale può rilevare la natura del segnale (stazionario, non stazionario) e la presenza di alcune periodicità intrinseche. Semplici metriche applicate al segnale temporale possono fornire informazioni utili non fornite da analisi in altri domini. Tali metriche sono semplici da implementare e possono essere determinate attraverso l'analisi della probabilità.

Per effettuare tale analisi ci si può riferire a:

- parametri energetici (**energia del segnale**);

- parametri di dispersione e regolarità (**forma del segnale**).

Il valore **RMS** è un esempio di parametro energetico ed è una misura dimensionale che esprime l'energia del segnale. Il **Fattore di Cresta** ed il **coefficiente temporale di Kurtosis** (Equazione (1)) forniscono un'indicazione riguardo al carattere impulsivo del segnale.

$$TK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(s(i) - \bar{s})^4}{\sigma^4} \quad (1)$$

dove  $s(t)$  è l'ampiezza istantanea del segnale,  $\bar{s}$  è l'ampiezza media,  $\sigma^2$  è la varianza del segnale ed  $N$  è il numero di campioni.

Un parametro studiato recentemente che fornisce un'altra indicazione riguardo alla regolarità del segnale è l' **Approximation Entropy (Appen)** che appunto quantifica la regolarità di una serie temporale.

Lo sfondo teorico della Appen è sviluppato da Pincus in [92]. Tale parametro è stato verificato essere efficace nel campo dell'ingegneria biomedica, dell'analisi dei dati fisiologici e del movimento umano. Recentemente, l'applicazione di Appen è stata estesa ai monitoraggio e diagnostica delle macchine [93].

Yan e Gao [94] hanno studiato l'utilità di Appen in un sistema di monitoraggio e studiato gli effetti dell'utilizzo di diversi parametri dell'algoritmo di calcolo.

La **media sincrona (TSA)** è una tecnica di elaborazione dei segnali che consente nell'ottenere forme d'onda periodiche ed estrarle da segnali rumorosi. Mediante TSA è possibile trasformare il segnale grezzo acquisito nel dominio temporale in un segnale nel dominio angolare (ricampionamento angolare) per poi effettuare una media sul periodo caratteristico della macchina di interesse. Il segnale angolare è definito per intervalli angolari costanti. Il periodo ciclico risulta essere 720 gradi per un motore a 4 tempi. Per effettuare il ricampionamento a partire dal segnale temporale è necessario applicare un algoritmo di **Computed Order Tracking (COT)**. Tale algoritmo viene applicato in fase di post-processing ovvero al segnale analogico già convertito e campionato su base tempo. Questo viene spesso realizzato utilizzando un segnale analogico di velocità di riferimento che fornisce un impulso per giro dell'organo rotante in questione [95][96]. Tuttavia un encoder ottico che fornisce un segnale analogico con più impulsi al giro può essere utilizzato per ottenere una migliore risoluzione angolare. La tecnica COT effettua il ricampionamento attraverso metodi di interpolazione che assumono che l'organo rotante abbia accelerazione costante nel tratto compreso tra due impulsi del segnale di velocità di riferimento.

L'alternativa al COT è il tradizionale metodo dell'**Order Tracking (OT)** che campiona il segnale in base angolo durante la stessa acquisizione in base tempo: si tratta quindi di un metodo on-line. La frequenza di campionamento viene adattata in modo continuo dal sistema di acquisizione in funzione della velocità dell'organo rotante. Anche in questo caso è necessario un segnale di velocità di riferimento.

Tecniche specifiche sono state proposte anche per effettuare il ricampionamento angolare senza la necessità di un segnale analogico di velocità di riferimento [97].

Una tecnica proposta recentemente calcola la TSA ricavando l'informazione di fase istantanea dell'organo rotante dalla demodulazione di fase del segnale di vibrazione [98]. Altre tecniche utilizzano un metodo di rilevamento del picco della trasformata di Fourier per ricercare le componenti in frequenza con i valori di ampiezza più alti nel diagramma tempo-frequenza [99].

Come presentato in [100], le storie temporali normalizzate del segnale di vibrazione e rumore acquisito in motori diesel possono essere rappresentati sotto forma di grafici a punti simmetrizzati attraverso il metodo **Symmetrized Dot Polar (SDP)**. La formulazione utilizzata per la trasformazione del segnale è descritta in [101]: un punto nel tempo del segnale viene mappato in una componente radiale, e il punto adiacente è mappato in una componente angolare.

Per attuare la tecnica dell' SDP in una procedura di monitoraggio per la rivelazione di guasti, è necessario sviluppare un sistema di correlazione di immagini [102]. Questo può essere fatto applicando un algoritmo di **Edge detection** (rilevamento dei bordi), illustrato in [102] che rappresenta l'approccio più comune per rilevare discontinuità significative in valori di intensità di colore. L'idea alla base del rilevamento dei bordi è quella di trovare i punti in cui l'intensità cambia con un alto gradiente. L'algoritmo di rilevamento dei bordi viene applicato sull'immagine ottenuta attraverso la tecnica SDP. Il risultato consiste in una matrice logica che presenta valori unitari (rappresentati come pixel bianchi nella scala dei grigi) dove sono stati rilevati i punti del bordo sulla immagine, e di valori nulli (pixel neri) altrove.

L'obiettivo è quello di identificare un modello (**pattern**) di riferimento che rappresenta la condizione 'sana' del motore e poi confrontare le immagini ottenute da tutti i motori testati con questo modello di riferimento mediante un parametro di correlazione. Tra molte possibilità, questo parametro può essere scelto come la percentuale di pixel bianchi comuni rispetto al numero totale di pixel bianchi nel pattern del motore in condizioni sane.

Come già anticipato per trasformare i segnali dal dominio del tempo al dominio della frequenza viene applicata la Trasformata di Fourier (spettro) al segnale temporale [103]. Le principali caratteristiche di questo approccio sono che:

- i risultati che si ottengono sono il risultato di una media effettuata per la durata dell' intervallo di osservazione;
- la risoluzione in frequenza del segnale è limitata dalla lunghezza dell'intervallo di osservazione.

Quando si lavora con segnali non-stazionari, in cui le proprietà del segnale variano con il tempo, l'analisi di Fourier ripetuta per segmenti temporali consecutivi cerca di descrivere la variazione temporale dello spettro del segnale. Questa tecnica ben nota è chiamata **Short Time Fourier Transform (STFT)**.

Le principali limitazioni di questo approccio sono:

- per ogni segmento di tempo analizzato, solo i risultati "medi" vengono ottenuti; ciò richiede un'analisi per segmenti brevi per una ottenere una buona risoluzione temporale;
- più il segmento temporale è breve, più grossolana è la risoluzione di frequenza che ne deriva.

Una spiegazione più rigorosa di quest'ultima limitazione è il principio di indeterminazione che viene dimostrato in [28] attraverso il teorema di Parseval e la disuguaglianza di Schwartz. Il principio di indeterminazione indica un limite del metodo di analisi STFT: un'elevata risoluzione contemporaneamente in entrambi i domini del tempo e della frequenza non può essere ottenuta.

Sono state sviluppate diverse tecniche [104] [105] per superare questa limitazione e analizzare diversi tipi di segnali non stazionari.

Come ben riportato in si possono distinguere tre importanti classi di **segnali non stazionari**:

- segnali **armonici evolutivi** legati ad un fenomeno periodico (ossia rotazione) di frequenza variabile;

- segnali **a banda larga evolutivi** con uno spettro a banda larga, ma con contenuto spettrale che evolve nel tempo (come ad esempio il rumore di rotolamento causato dal contatto pneumatico-asfalto);
- segnali **transitori** che mostrano una durata temporale molto breve ma con una variazione di ampiezza molto rilevante (come ad esempio il rumore generato dalla chiusura di una porta o dall'evento di combustione generata nella camera di un cilindro).

Un'altra importante classe di segnali non stazionari è rappresentata dai segnali **ciclostazionari** precedentemente introdotti.

Per quanto concerne lo studio dei segnali non stazionari l'analisi attraverso **Wavelet** e **Wigner-Ville Distribution (WVD)** viene frequentemente proposta.

Mentre l'analisi di Fourier descrive il segnale temporale attraverso un set di funzioni sinusoidali (cosinusoidali) continue e di durata infinita l'analisi Wavelet descrive il segnale temporale attraverso 'ondine' localizzate nel tempo e di durata finita e variabile [106][110]. Il fatto di descrivere il segnale con ondine di lunghezza (e frequenza) variabile permette, a differenza dell'analisi di Fourier, di ottenere un'alta risoluzione a basse frequenze nel dominio della frequenza ed un'alta risoluzione per le alte frequenze nel dominio del tempo. Questa proprietà rende l'analisi Wavelet un'utile strumento per analizzare segnali transienti in applicazione di monitoraggio e diagnostica [111]-[118].

Quando le 'ondine' sono funzioni definite analiticamente si parla di tecnica **CWT (Continuous Wavelet Transform)**. Quando invece sono definite attraverso una procedura iterativa la tecnica prende il nome di **DWT (Discrete Wavelet Transform)** [120][127].

La trasformata wavelet continua (CWT) di un segnale temporale  $x(t)$  è definita come:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

con

$$a \in \mathbb{R}^+ - \{0\}, b \in \mathbb{R}$$

Questa è una trasformazione lineare che decompone il segnale originale in funzioni elementari  $\psi_{a,b}$ :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad (3)$$

che sono determinate dalla traduzione (parametro  $b$ ) e la dilatazione (parametro  $a$ ) di una cosiddetta 'wavelet madre'  $\psi(t)$ .

Il parametro  $b$  descrive la localizzazione temporale della wavelet, mentre la dilatazione  $a$  determina la larghezza o la scala del wavelet. Vale la pena notare che, diminuendo il parametro di scala  $a$ , la frequenza di oscillazione delle wavelet aumenta ma la durata delle oscillazioni diminuisce, mantenendo quindi esattamente lo stesso numero di cicli all'interno di ogni wavelet.

Se nell'Equazione (11) i parametri  $a$  e  $b$  diventano potenze di due:

$$a = 2^j, b = k2^j, j, k, \in Z$$

dove  $j$  è chiamato livello,  $2^j$  indica la scala e  $k2^j$  denota lo spostamento nella direzione temporale. La trasformata discreta wavelet (DWT) è definita come:

$$c_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*(2^{-j}t - k) dt \quad (4)$$

dove la funzione elementare è

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k)$$

e dove  $c_{j,k}$  sono i coefficienti wavelet o coefficienti di dettaglio che rappresentano la trasformazione nel dominio tempo-frequenza del segnale originale.

L' **algoritmo di implementazione della CWT** viene presentato da Wang e Mc Fadden in [119], l'output è la rappresentazione in un grafico tempo-frequenza bi-dimensionale (la terza dimensione viene rappresentata dalla scala dei colori). Diversi metodi per migliorare l'efficienza diagnostica dei grafici tempo-frequenza della CWT sono stati implementati [123][124][125][126].

L'**algoritmo di implementazione della DWT** [121][122][128] permette il calcolo simultaneo di diverse versioni del segnale temporale filtrato in differenti bande di frequenza.

Simile alla DWT è il metodo **Empirical Mode Decomposition (EMD)** che decompone il segnale in diverse bande di frequenza non utilizzando come base le ondine ma funzioni dette '**Intrinsic Mode Function**' che hanno la caratteristica specifica di assumere il valore nullo ed i valori massimi lo stesso numero di volte [129]. Mentre nella tecnica DWT le differenti bande di frequenza vengono scelte a priori dall'utente, nella EMD le bande dipendono dal segnale di interesse. Si dice quindi che le Intrinsic Mode Function sono auto-adattive. L'applicazione della Trasformata di Hilbert-Huang alle Intrinsic Mode Functions è una variante della tecnica EMD.

La **Wigner-Ville Distribution (WVD)** è la Trasformata di Fourier della funzione di autocorrelazione del segnale analitico del segnale originale e si presenta anch'essa come grafico bi-dimensionale tempo-frequenza. Essa possiede il vantaggio, rispetto a CWT, di avere un' alta risoluzione in tutto il dominio tempo-frequenziale. Mostra però, come aspetto negativo, la presenza di termini fittizi che compaiono all'interno del grafico bi-dimensionale traendo in inganno l'utilizzatore che può associare a tali termini presenze di anomalie. Diversi autori in letteratura hanno studiato metodi per la riduzione di questi termini [130].

Come detto precedentemente un altro metodo di analisi dei segnali non-stazionari è utilizzare il modello **ciclostazionario** del segnale che risulta particolarmente utile nel studiare non le variazioni di ampiezza del segnale ma le variazioni di energia. Quando infatti si hanno variazioni periodiche di energia sincrone con il ciclo caratteristico della macchina il segnale viene definito ciclostazionario. In modo più rigoroso il segnale viene detto ciclostazionario in senso lato se la media e la funzione di autocorrelazione del segnale definite nel dominio angolare (attraverso tecniche di ricampionamento COT e OT descritte in precedenza) sono periodiche.

Matematicamente, un segnale che soddisfa la periodicità dei primi due momenti, può essere considerato ciclostazionario in senso largo:

- ciclostazionario del primo ordine

$$m_x(t) = E\{x(t)\} = m_x(t + T) \quad (5)$$

- ciclostazionario del secondo ordine

$$R_{xx}(t_1, t_2) = E\{x(t_1)x^*(t_2)\} = R_{xx}(t_1 + T, t_2 + T) \quad (6)$$

dove  $E\{\blacksquare\}$  sta per il valore atteso e  $T$  è il periodo di tempo.

Poiché questa periodicità è collegata con l'esistenza di un ciclo di base in macchine rotanti, è più conveniente riferirsi ad un periodo ciclico nel dominio angolare.

Quindi le equazioni (12) e (13) possono essere espresse nel dominio angolare come segue:

$$m_x(\theta) = E\{x(\theta)\} = m_x(\theta + \theta)$$

$$R_{xx}(\theta_1, \theta_2) = E\{x(\theta_1)x^*(\theta_2)\} = R_{xx}(\theta_1 + \theta, \theta_2 + \theta)$$

L'analisi ciclostazionaria [131][132][133] permette inoltre di studiare non solo gli eventi periodici con il ciclo caratteristico della macchina ma anche tutti gli eventi che succedono in differenti posizioni angolari dell'organo rotante di riferimento ad ogni ciclo. Questo garantisce alle tecniche di analisi un'elevata potenzialità diagnostica di ICE [134][135][136][137][138].

Come anticipato la caratterizzazione di componenti non stazionari all'interno di un segnale misurato in condizioni difettose viene normalmente analizzato da indicatori statistici sensibili alla regolarità del segnale ed, in particolare, alla presenza di eventi impulsivi e quindi ad una rapida variazione temporale dell'involuppo. Per esempio il **Coefficiente di Kurtosis temporale (TK)** ed il **Fattore di Cresta** sono particolarmente adatti a questo tipo di analisi. Il **valore RMS**, invece, può solo caratterizzare il livello energetico medio del segnale ma non fornisce indicazioni sulla variazione temporale istantanea del segnale. Come menzionato in [139] il TK assume

- alti valori in presenza di impatti;
- valori nulli quando solo rumore di fondo è presente;

La prima condizione si verifica quando gli impatti sono ben separati tra loro e quando il rapporto segnale/rumore è sufficientemente alto.

La seconda condizione è vera quando il rumore di fondo può essere assunto gaussiano come cioè il risultato della sovrapposizione di un alto numero di sorgenti indipendenti (e stazionarie).

In pratica queste due condizioni sono raramente soddisfatte.

Il **Kurtosis Spettrale (SK)** è una statistica spettrale che assume valori nulli alle frequenze dove solo rumore gaussiano e stazionario è presente mentre assume valori elevati a quelle frequenze dove appaiono

transienti e valori negativi in presenza di componenti armoniche. Quindi **SK** risulta essere un'utile strumento per identificare componenti non stazionarie nascoste all'interno di segnali rumorosi.

Alcuni tra i primi studi riguardanti la tecnica dello SK sono stati effettuati da Vrabie [140][141]. La prima formalizzazione teorica è stata fatta da Antoni utilizzando la definizione di 'processi condizionatamente non-stazionari' e studiati attraverso la decomposizione di Wold-Cramer [142]. Antoni ha inoltre introdotto uno stimatore del SK basato sulla **Short Time Fourier Transform (STFT)** che rappresenta un ottimo strumento nel unire la definizione teorica alle applicazioni pratiche. Tale stimatore è simile a quello utilizzato da Vrabie e definito come segue:

$$\hat{K}_x(m) = \frac{M}{M-1} \left[ \frac{(M+1) \sum_{i=1}^M |X_i(m)|^4}{\left( \sum_{i=1}^M |X_i(m)|^2 \right)^2} - 2 \right] \quad (7)$$

Il segnale viene diviso in un numero di blocchi  $M$  con il 75% di sovrapposizione, ciascuno di lunghezza  $N$ .

Come descritto in precedenza la STFT è una tecnica tempo-frequenza in cui viene effettuata una Trasformata di Fourier per diversi segmenti temporali del segnale. Il principale limite di questo stimatore è la scelta della lunghezza temporale di tali segmenti. Per superare questa limitazione Antoni e Randall [139] hanno proposto l'applicazione del 'kurtogram' che è una mappa formata dai valori di SK in funzione della lunghezza temporale del segmento. Il kurtogram ha però costi computazionali elevati e dimostra perciò una scarsa applicabilità in sistemi di diagnostica industriale ed on-board. Per ottenere uno stimatore meno pesante dal punto di vista computazionale Antoni ha proposto un algoritmo più efficiente in [143].

La Table 6 riassume i criteri di scelta delle tecniche di analisi del segnale non parametriche fin qui descritte in funzione delle caratteristiche di implementazione in sistemi di monitoraggio e diagnostica.

#### 4. Acoustic signal-based techniques

Il presente paragrafo illustra lo stato dell'arte su tecniche di monitoraggio diagnostica basate su segnale acustico (PA). Fornisce un'indicazione sui punti di misura del segnale acustico, su quali sono le condizioni operative che favoriscono l'acquisizione di un segnale maggiormente informativo. Vengono inoltre evidenziate quali delle difettologie analizzate possono influire sugli aspetti di confort all'interno del abitacolo.

Come analizzato nella Sezione 3 l'utilizzo del segnale di vibrazione [144] acquisito attraverso accelerometri risulta essere utile per il monitoraggio di difetti in sistemi meccanici data l'elevata gamma dinamica e l'ampio range in frequenza di utilizzo.

Anche il segnale acustico di pressione sonora (di seguito denominato **segnale PA**) può essere adottato come strumento di monitoraggio e diagnostica in sistemi meccanici.

I vantaggi dell'acquisizione del segnale PA sono:

- ampio range in frequenza di utilizzo (20-20 kHz);

- misurabili senza contatto sulla struttura permettendo così l'acquisizione in condizioni di umidità e temperature estreme; non si hanno quindi i vincoli relativi all'influenza di massa e alla necessità di usufruire di superfici piane quando si utilizzano accelerometri;
- possibilità di ottenere informazioni con un numero di sensori limitato.

Nonostante ciò, alcune difficoltà possono insorgere nell' utilizzo del segnale PA a causa dell'elevato livello di rumore di fondo che circonda l'ambiente di misura. Alcune tecniche specifiche di pre-processamento per separare il contenuto fornito dalle sorgenti reali dal rumore possono essere adottate, ma spesso il rumore ambiente non è né bianco (contenuto energetico in un ampio intervallo di frequenze), né armonico, né stazionario, creando quindi ulteriori problemi nell'applicare le tecniche di separazione. Inoltre l'eventuale anomalia spesso non si rivela come cambiamento del confort acustico in abitacolo (come descritto in Table 2) e quindi non direttamente trasferita per via aerea e non percepibile dall'orecchio umano.

E' importante ricordare che durante la propagazione del suono le onde sonore vengono riflesse, rifratte e attenuate. Se le sorgenti sonore si trovano in uno spazio chiuso, la riflessione causata dallo spazio chiuso influenza le caratteristiche della sorgente sonora, ed aumenta le difficoltà per la diagnosi dei guasti attraverso l'analisi di tali segnali. Possono inoltre apparire interferenze generate da altri tipi di segnali (per esempio quelli elettrici). Questo succede anche quando il segnale PA viene misurato molto vicino all'organo di interesse.

A causa di ciò sistemi e metodologie di monitoraggio e diagnostica basate sulla pura analisi del segnale PA e non combinata con l'analisi del segnale di vibrazione non sono numerose in letteratura. Sempre per tale motivo l'analisi nel dominio del tempo risulta essere di più difficile interpretazione rispetto a quanto visto per il segnale di vibrazione. Un solo lavoro di Li [146] utilizza segnali temporali registrati da un microfono posto sopra al centro del basamento motore per diagnosticare **aperture anormali delle valvole** attraverso un algoritmo decisionale basato sulle **Reti Neurali**.

Un primo strumento utile per l'analisi del segnale PA è l'analisi nel dominio della frequenza che viene svolta, come visto, attraverso l'applicazione della Trasformata di Fourier.

In un sistema meccanico semplice composto da ruote dentate, rotori e alberi, cuscinetti a rotolamento ed a lubrificazione e giunti flessibili il fattore comune è rappresentato dal moto di rotazione. Il rumore dominante è in qualche modo sempre correlato in qualche maniera alla rotazione. Per quanto riguarda le **ruote dentate** la sorgente dominante è l'interazione tra i denti che si analizza facilmente attraverso un'analisi in frequenza. Un difetto concentrato delle ruote (dente scheggiato o rotto) si manifesta attraverso la variazione in frequenza della componenti relative alla rotazione dell'albero, interazioni tra i denti e armoniche corrispondenti. Recentemente l'analisi dell'usura in ruote dentate attraverso il segnale PA è stata effettuata attraverso la tecnica del '**Bispectrum**' non frequentemente utilizzata in letteratura. Per quanto riguarda **gli alberi ed i rotori** la rumorosità legata a possibili difetti di sbilanciamento e disallineamento si esplica anch'essa in frequenza alle componenti della rotazione alle prime armoniche. Mentre la principale causa di rumore in **cuscinetti a rotolamento** è il contatto tra gli elementi volventi e le relative piste, in **cuscinetti a strisciamento** è l'attrito che aumenta in condizioni di scarsa lubrificazione. Un'altra sorgente dei cuscinetti a strisciamento è il cosiddetto '**oil whirl**' , fenomeno causato dall'interazione tra il film d'olio che ruota solidale con l'albero e quello che rimane fermo a contatto con il cuscinetto. Tale tipo di rumorosità assume una frequenza che è la metà di quella di rotazione. Come visto in [33] l'analisi delle sorgenti di difettosità in cuscinetti viene maggiormente affrontata attraverso il segnale di vibrazione a causa del più elevato rapporto segnale/rumore rispetto al **segnale PA**. Solo in piccoli sistemi di

prova è possibile utilizzare il segnale PA per scopi di diagnostica: Chiariotti [147] utilizza il **Kurtosis Spettrale** per separare le componenti impulsive dal segnale PA misurato in prossimità a circa 5 cm dai cuscinetti.

Anche le **ventole assiali e radiali** (in maniera maggiore quelle assiali) possono fornire componenti in frequenza di rumorosità caratteristiche legate al numero di pale ed alla velocità di rotazione dell'albero che le comanda. In presenza di **sbilanciamenti o di difetti di una delle pale** tali rumorosità caratteristiche aumentano.

L'analisi in frequenza del segnale PA risulta essere utile anche per studiare difettologie in **pompe idrauliche** (alternative, centrifughe, a vite e ad ingranaggi) che possono essere soggette a problemi quali sbilanciamenti, disallineamenti, risonanze e cavitazione. Per concludere, anche componenti elettrici come **motori elettrici, generatori ed alternatori** possono presentare **difetti meccanici, aereodinamici ed elettromagnetici** anch'essi analizzabili attraverso l'analisi in frequenza.

Risulta quindi evidente che l'analisi in frequenza permette l'individuazione di diverse sorgenti di difettologie in molteplici organi meccanici che abbiano componenti in rotazione. Un metodo per migliorare la visualizzazione in frequenza è quello di utilizzare spettri non a banda fine ma a **banda percentuale costante** in cui l'asse frequenziale delle ascisse di un grafico ampiezza-frequenza (spettro) viene rappresentato in formato logaritmico e non lineare. Questo permette di:

- ottenere un'unica rappresentazione per un ampio intervallo di frequenze;
- evitare che cambiamenti delle condizioni operative in termini di carico e di velocità possano alterare la rappresentazione dello spettro e quindi nascondere eventuali difettosità;
- costruire uno spettro di riferimento detto anche '**maschera**' che può essere utilizzato per confronto per evidenziare la comparsa di anomalie.

Nonostante l'analisi in frequenza permetta di evidenziare componenti in frequenza chiare e ben definite che possono essere associate alla presenza di un difetto essa, come visto, è utilizzabile quando applicata a segnali stazionari. Inoltre l'estrema sensibilità del segnale PA al rumore di fondo può nascondere la comparsa delle componenti in frequenza richiedendo quindi l'utilizzo di tecniche di pre-processamento per separare il contenuto informativo del segnale dal rumore.

**Tecniche di pre-processamento** per l'ottenimento di segnali PA maggiormente informativi sono state trattate in letteratura. In particolare si è cercato principalmente di separare il rumore dovuto alla combustione dal rumore meccanico. Pruvost [148] ha utilizzato una tecnica di filtraggio chiamata '**spectrofilter**' su segnali di vibrazione utilizzando il segnale di pressione all'interno della camera di combustione in condizioni stazionarie. Antoni ha fatto lo stesso ma su segnali PA in condizioni stazionarie [149] e non stazionarie durante rampe di velocità [150].

Maggiormente dedicato è il lavoro di Albarbar il quale utilizza sia l' **Independent Component Analysis (ICA)** [151] che un **filtro adattivo** [152] come tecniche di pre-processamento per filtrare il segnale PA misurato a 25 cm dagli iniettori di un ICE. I segnali così pre-processati, essendo non-stazionari, vengono analizzati con la **tecnica tempo-frequenza WVD** per riconoscere il rumore meccanico prodotto dagli urti degli **iniettori** dal rumore di combustione. In questa applicazione l'output dell'analisi del segnale è un **grafico bi-dimensionale**.

In [152] viene indicato un modello della risposta acustica di un ICE così definito:

$$S(t) = s_1(t) + s_2(t) + s_3(t) + s_4(t)$$

Dove  $s_1(t)$  è il contributo delle componenti tonali alla fondamentale e armoniche della rotazione motore;  $s_2(t)$  è il contributo delle armoniche non relative alla rotazione motore;  $s_3(t)$  è il contributo delle componenti impulsive e transienti;  $s_4(t)$  è il rumore di fondo a banda larga. Il rumore di fondo dipende dal tipo di microfono (rumore elettrico caratteristico), sua posizione e dall'acustica dell'ambiente in cui è posizionato.

Anche Li utilizza **ICA** in [153] per pre-processare il segnale PA ed ottenere non solo la separazione relativa alle operazioni degli iniettori ma anche del **pistone** (impatti contro cilindro) e delle **valvole (aperture e chiusure)**. In questo caso Li utilizza come tecnica di analisi tempo-frequenza la **CWT** e quindi di nuovo come output produce un grafico bi-dimensionale.

Yadav [154][155] non utilizza tecniche di pre-processamento bensì un'analisi combinata nel dominio del tempo (parametri energetici e parametri di dispersione e regolarità) e nel dominio tempo-frequenza attraverso **STFT** ed **EMD**. Yadav crea appositamente le condizioni difettose riguardanti lo scarso tensionamento della catena di distribuzione, giochi nelle punterie delle valvole, urti del pistone contro il cilindro e difetti sulla ruota dentata primaria della distribuzione. Dopo aver creato la situazione difettosa ne studia gli effetti sul segnale PA ed in particolare sui **parametri numerici** (dominio del tempo) e sui **grafici bi-dimensionali** tempo-frequenza. Questi ultimi diventano i pattern di **input** ad un algoritmo decisionale basato sulle reti neurali. I segnali PA vengono acquisiti attraverso 4 microfoni che circondano il motore a distanza ravvicinata dal monoblocco.

Wang in [156] utilizza una tecnica derivata dall' **EMD**, la Trasformata di Hilbert Huang, per diagnosticare, attraverso l'algoritmo di Support Vector Machine (SVM) **difetti nel circuito di iniezione e della valvola a farfalla**. Il segnale PA in questione viene acquisito in un unico punto in corrispondenza del baricentro del motore a 300 mm dal monoblocco.

Abarbar in [157] applica la **CWT** nel **dominio angolare** ad un segnale PA misurato in una posizione sopra la testa cilindri per rilevare **difetti di iniezione e combustione**. Abarbar, attraverso la tecnica CWT, dimostra che il segnale PA è dipendente dalle condizioni di carico e velocità. Per effettuare l'analisi nel dominio angolare viene utilizzata la tecnica Computed Order Tracking utilizzando il segnale di riferimento della posizione dell'albero a camme ed un segnale di riferimento della ruota dentata calettata sull'albero motore.

In [154][155] [157] [156] vengono utilizzati microfoni a condensatore. Nei primi tre riferimenti il modello è prodotto da PCB. In [154][155] viene utilizzato per l'acquisizione un sistema su piattaforma LabVIEW 8.0 con scheda di acquisizione cDAQ-9172. In [157] [156] viene utilizzato un sistema Cambridge Electronic Design (CED) 1401. La scheda ADC ha 16 canali di input 12bit e 16 porte I/O digitali.

Anche Da Wu [158] e Figlus [159] utilizzano tecniche tempo-frequenza su segnale acustico a scopi diagnostici. In particolare Da Wu utilizza la **Continuous Wavelet Transform (CWT)** per diagnosticare difetti di **mancata accensione cilindro, perdite nel condotto di aspirazione, ventola di raffreddamento con pale danneggiate**. Da Wu utilizza un microfono a condensatore modello ACO P4012 ed un sistema di acquisizione TMS320C32 DSP.

Figlus utilizza invece la **Discrete Wavelet Transform (DWT)** per diagnosticare **difetti di apertura valvola** in un sistema acustico on-board.

Risulta quindi evidente che l'analisi tempo-frequenza è la tecnica maggiormente utilizzata per monitorare e diagnosticare anomalie in ICE. Tra queste tecniche assume particolare rilievo la **CWT** che fornisce come input all'algoritmo decisionale un grafico tempo-frequenza, quindi un **grafico bi-dimensionale**.

In [160] Li fornisce un metodo di elaborazione di immagini per migliorare l'efficacia dei grafici bi-dimensionali risultanti dall'analisi tempo-frequenza nell'individuare la presenza del guasto prima di essere trattati dall'algoritmo decisionale.

Non solo grafici bi-dimensionali derivanti da un'analisi tempo-frequenza possono essere trattati da algoritmi decisionali ma anche grafici che sono il risultato di **trasformazioni polari** del segnale temporale originale. Riguardo ciò Cheng [161], Shibata [162] e Da Wu [163] applicano la tecnica **Symmetrized Dot Pattern** per difettologie di **mancata accensione cilindro, perdite nel condotto di aspirazione, difetti di iniezione e difetti della ventola di raffreddamento**. Il vantaggio di tale tecnica di monitoraggio (e non di diagnostica) è l'ottenimento di una discriminazione chiara tra lo stato sano e difettoso. Lo svantaggio è la forte sensibilità alla presenza del rumore. Nelle applicazioni descritte il segnale PA viene acquisito da due microfoni posti nel sottocofano, uno in prossimità della ventola di raffreddamento, l'altro in prossimità del monoblocco. In [162] viene utilizzato un microfono a condensatore fissato ad un connettore parabolico per incrementarne la direttività.

Charles [164] invece trasforma il segnale temporale della velocità angolare istantanea dell'albero motore in una **rappresentazione polare** associando alla rappresentazione gli eventi notevoli del ciclo motore per diagnosticare **difetti di iniezione**.

Si sottolinea che per le applicazioni citate la scelta del numero e del posizionamento dei microfoni per la rilevazione del **segnale PA** non segue un criterio ben definito. Si possono trovare applicazioni con un solo microfono posto in zona centrale rispetto al basamento del ICE oppure applicazioni con diversi sensori posizionati in prossimità dei componenti del ICE su cui si vuole effettuare la diagnosi. Frenne in [165] suddivide le zone di acquisizione del ICE in: coperchio distribuzione, coperchio punterie e condotto di aspirazione, parte destra e sinistra del basamento. Utilizza un microfono a condensatore modello Bruel & Kjaer. Una laboriosa analisi basata su TPA (Transfer Path Analysis) può indicare quali sono le superfici dell'ICE maggiormente irradianti. In [166] per esempio vengono studiate le principali vie di trasmissione strutturali del rumore di combustione.

La ricerca di metodologie per il monitoraggio e la diagnostica di VMCI si riduce in gran parte in descrizioni del sottosistema ICE e della trasmissione.

Come illustrato in Table 5 le tecniche di analisi del segnale maggiormente utilizzate in letteratura sono quelle **tempo-frequenza**. Poche applicazioni relative al **sottosistema sospensioni-pneumatici-altre parti** veicolo esistono in letteratura. Analisi acustiche relative a rumorosità di freni, sportelli, vassoi, coperchi e segnali di avviso sono per lo più effettuati con scopi di valutazione di comfort acustico piuttosto che per analisi diagnostiche [167].

In [168] Jiang pone l'attenzione sullo studio acustico del solo condotto di scarico per identificare eventuale anomalie di combustione in motori diesel. In [169] vengono illustrati approcci per valutare l'esistenza di rumori fastidiosi in interno abitacolo di un veicolo intero al termine della linea di produzione attraverso tecniche che utilizzano mappe spaziali quali Beamforming e Near Field Acoustic Holography.

In [170] viene effettuata un'analisi teorica e sperimentale per rilevare e prevedere il rumore emesso da una sola **ventola** in condizioni sane ed in condizione difettose.

In [171] vengono ottimizzate le performance acustiche di un **filtro dell'aria** di aspirazione. In [172] viene effettuato uno studio psicoacustico attraverso metriche di Sound-Quality per caratterizzare il rumore emesso dagli **alzacrystalli elettrici**.

Come già anticipato l'analisi acustica di un intero veicolo o parti di essa viene essenzialmente fatta non per scopi diagnostici real time ma per identificare sorgenti di rumore ad interno abitacolo [173]. Questo tipo di attività viene svolta sia in fase di prototipazione che eventualmente per la risoluzione di problematiche emerse a produzione già avviata. Vengono utilizzate tecniche di mappatura spaziale basate su **Beamforming** e **Near Field Acoustic Holography**.

Mentre il **Beamforming** si basa su misure effettuate attraverso un array di microfoni ad una certa distanza dal componente ed ha l'obiettivo di localizzare la sorgente, la tecnica del **Near Field Acoustic Holography** permette di quantificare il contributo della sorgente misurando ad una distanza ravvicinata dal componente [174][175][176] **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

## 5. Critical discussion

I parametri di monitoraggio devono riassumere le misure nel modo più rilevante e non ridondante. Essi devono contenere sufficienti informazioni diagnostiche tali da rendere possibile la rilevazione ed il riconoscimento del guasto molto facilmente.

Alcune semplici accorgimenti possono essere:

- per le rumorosità che si trasmettono per via strutturale è possibile utilizzare per l'analisi **le bande di frequenza caratteristiche delle risonanze** delle superfici del componente da diagnosticare per avere un miglior rapporto segnale/rumore;
- considerare l'utilizzo di tecniche di analisi del segnale che prevedano **un'operazione di media nel dominio del tempo o nel dominio dell'angolo**;

Per la scelta della tecnica di analisi del segnale valgono le seguenti considerazioni.

Se l'analisi è condotta nel **dominio del tempo** una soluzione è quella di considerare l'intera forma d'onda temporale per un'analisi nel dominio del tempo. Tuttavia questa soluzione è altamente ridondante. Di solito, come detto, **la forma d'onda viene riassunta nel tempo mediante un piccolo numero di parametri scalari**. Per poter utilizzare i parametri diagnostici in un sistema automatico di decisione, è auspicabile che essi soddisfino un certo numero di proprietà ulteriori: i parametri devono essere il più possibile insensibili al rumore di fondo; indipendenti per evitare la ridondanza con informazioni non necessarie e devono essere di facile e veloce implementazione; normalmente è più opportuno considerare versioni filtrate della forma d'onda in bande di frequenza che massimizzano il rapporto segnale-rumore.

Se l'analisi è condotta nel **dominio della frequenza** fenomeni differenti possono essere caratterizzati da diversi intervalli di frequenza. Quindi l'analisi spettrale offre una soluzione adatta per separarli. Il calcolo della Trasformata di Fourier viene effettuato attraverso l'algoritmo di Fast Fourier Transform.

Lo stesso algoritmo è utilizzato anche per le misure di segnali **ciclostazionari**, in cui la Fast Fourier Transform viene calcolata su alcune trasformazioni non lineari del segnale, come la potenza istantanea del segnale. I valori degli spettri sono adatti per essere trattati da un sistema di decisione automatico. Nel caso di misure non stazionarie, l'approccio basato sui valori spettrali non si applica.

Un modo molto semplice per analizzare segnali in condizioni di misura non stazionarie è condurre un'analisi **tempo-frequenza**. Attraverso la ricerca bibliografica si è visto come l'utilizzo delle tecniche Wavelet è molto frequente per la generazione di grafici bi-dimensionali trattati da algoritmi di decisione automatici.

Nonostante lo stato dell'arte indichi un prevalente utilizzo di tecniche tempo-frequenza si ritiene opportuno, sulla base dell'esperienza, suggerire tecniche di più **facile e veloce implementazione (dominio del tempo (angolo), frequenza e ciclico)** che forniscano come input all'algoritmo decisionale **un parametro**.

- un algoritmo di analisi del segnale che preveda una tecnica di pre-processamento, di facile implementazione e che fornisca come input all'algoritmo decisionale un parametro, non un grafico bi-dimensionale per motivi di velocità di calcolo e di capacità di memoria. Si propone quindi una metodologia di diagnosi completamente sperimentale e non basata su modello con l'utilizzo di una tecnica di analisi non-parametrica. La tecnica di analisi dovrà essere scelta sulla base del componente che si vuole monitorare;

Le condizioni di prova per l'acquisizione del segnale dovranno essere anch'esse scelte in funzione del componente da monitorare; l'inizio dell'acquisizione sarà determinato dal segnale di velocità dell'organo di riferimento, dal segnale dell'apertura della valvola a farfalla e dal segnale di temperatura dell'acqua motore; il segnale di velocità sarà utile inoltre per applicare la COT al termine dell'acquisizione: ciò significa che il segnale di velocità dovrà essere campionato alla stessa frequenza del segnale acustico.

In prima istanza pare difficile la rilevazione di sorgenti aerodinamiche a causa dell'effetto mascherante del rumore di fondo.

Nell'ottica di selezionare le difettologie più rilevanti dal punto di vista acustico e che possano incidere maggiormente sui costi di manutenzione si individuano le seguenti come le più rilevanti:

- urti del pistone contro cilindro;
- usura delle bronzine di biella;
- perdita di serraggio nei perni di biella;
- turbocompressore con palette difettose;
- ruote dentate della distribuzione difettose;
- ruote dentate della trasmissione difettose.

Il fatto che la radiazione acustica in presenza di queste difettologie si trasmette prevalentemente per via strutturale consente di ottenere un segnale acustico meno rumoroso e quindi maggiormente informativo.

## 6. Concluding remarks

# References

## 1. Introduction

- [1] J. Antoni, Cyclostationary by example, *Mech. Syst. Signal Process.* 23(2009)987–1036.
- [2] L- Garibaldi, J. Antoni; STATE OF THE ART AND DEVELOPMENTS OF DIESEL ENGINE IN-LINE TESTS MONITORING, *Proceeding of Surveillance 5 Cetim Senlis* (2004);
- [3] G. Zingali, STATE OF THE ART OF COLD ENGINE TESTING AND FUTURE DEVELOPMENTS, *Proceeding of Surveillance 5 Cetim Senlis* (2004);
- [4] S. Delvecchio, et al., On the use of cyclostationary indicators in IC engine quality control by cold tests, *Mech. Syst. Signal Process.* (2015),
- [5] A. Lucifredi, P. Silvestri, EXPERIENCES ON INNOVATIVE TRENDS IN THE FIELD OF ROTATING MACHINERY CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTICS, *Proceeding of Surveillance 5 Cetim Senlis* (2004);
- [6] Andrew K.S. Jardine, Daming Lin, Dragan Banjevic, A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 1483–1510
- [7] Aiwina Heng Sheng Zhang, Andy C. C. Tan, Joseph Mathew, Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities, *Mech. Syst. Signal Process.* (2009)
- [8] Man Shan Kan, Andy C. C. Tan, Joseph Mathew, A review on prognostic techniques for non-stationary and non-linear rotating systems, *Mech. Syst. Signal Process.* (2015), 62-63(2015)1–20
- [9] Yaguo Lei, Jing Lin, Zhengjia He, Ming J. Zuo, A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery, *Mechanical Systems and Signal Processing* 35 (2013) 108–126;
- [10] Z.K. Peng, F.L. Chu Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography *Mechanical Systems and Signal Processing* 18 (2004) 199–221
- [11] A.G. Poulimenos, S.D. Fassois, Parametric time-domain methods for non-stationary random vibration modelling and analysis — A critical survey and comparison *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 763–816
- [12] Patricia Henriquez, Jesus B. Alonso, Miguel A. Ferrer, and Carlos M. Travieso, Review of Automatic Fault Diagnosis Systems Using Audio and Vibration Signals, *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS: SYSTEMS* (2013)
- [13] N.B. Jones, “A review of condition monitoring and fault diagnosis for diesel engines”, Department of Engineering, University of Leicester.

## 2. Sound and vibration generation mechanisms in Internal Combustion Engine (ICE)

- [14] Rousounelos, A. Reduction of Sound Radiation from Automotive-Type Panels, *Doctoral Thesis Loughborough University*, 2010.
- [15] P. Saha, Developing Vehicle Sound Packages, *Sound and Vibration*, October 2011.
- [16] P. Van de Ponsele, H. Van der Auweraer, K. Janssens, Source-Transfer-Receiver approaches: a review of methods, *Proceedings of ISMA2012*, Leuven, Belgium, Pages 3645 – 3658.
- [17] S. Sanzebacher et al., 2012, Reducing propagation of structure-borne noise in transmission, *Proceedings of ISMA2012*, Leuven, Belgium, Pages 4017 – 4030.
- [18] Albarbar, F. Gu, A.D. Ball, A. Starr Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques, *Applied Acoustics*, Volume 71, Issue 12, December 2010, Pages 1132-1141
- [19] Waters, Lalor, Priede, The Diesel Engine as a source of commercial vehicle noise, *Proc Instn Mech Engrs* 1969-70, Vol. 134 .
- [20] W. Li et al., A study of the noise from diesel engines using the Independent Component Analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 15, Issue 6, November 2001, Pages 1165-1184
- [21] Shu Ge-qun, Wei Hai-qiao and Han Rui, The Transfer Function of Combustion Noise in DI-Diesel Engine *Proceedings of SAE*, 2005-01-2486.
- [22] T. Kamiński, M. Wendeker, K. Urbanowicz, and G. Litak, Combustion process in a spark ignition engine: Dynamics and noise level estimation, *Chaos* 14, 461 (2004).
- [23] Jeong-Guon Ih, Hoi-Jeon Kim, Seong-Hyun Lee, K. Shinoda, Prediction of intake noise of an automotive engine in run-up condition *Applied Acoustics*, Volume 70, Issue 2, February 2009, Pages 347-355.

- [24] Antoni J. et al. SEPARATION OF COMBUSTION NOISE AND PISTON-SLAP IN DIESEL ENGINE BY CYCLIC WIENER FILTERING, *Surveillance* 5 CETIM Senlis 2004;
- [25] L. Pruvost, Q. Leclere, E. Parizet Diesel engine combustion and mechanical noise separation using an improved spectro filter, *Mechanical Systems and Signal Processing* 23 (2009) 2072–2087;
- [26] Franz Brandl et al. The application of a new software tool for separating engine combustion and mechanical noise excitation, 2007 SAE International.
- [27] Hirano et al.; Using multiple regression analysis to estimate the contributions of engine radiated noise components, *JSAE Review*, Elsevier (20) 1999.

### **3. Vibration and AE signal-based methodologies and techniques**

#### General

- [28] Braun S, J. 1986, *Mechanical Signature Analysis*. Academic Press, London.
- [29] Collacot R. A. 1979, *Vibration Monitoring and Diagnostic*. Wiley, New York.
- [30] Mitchell J., S. 1981, *Machinery Analysis and Monitoring*. Penn Well Books, Tulsa,.
- [31] Wowk V. 1991, *Machinery Vibration Measurement and analysis*. McGrae Hill.
- [32] Natke H. G., Cempel C. 1977, *Model-aided Diagnosis of Mechanical Systems: Fundamental Detection, Localisation, Assessment*. Springer Verlag, Berlin.
- [33] Lyon R. 1987, *Machinery noise and diagnostics*, Butterworths, Boston.
- [34] Jardine, A. et al., 2006, A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 20(2006).
- [35] Martin, N., 2007, Advanced Signal Processing and condition monitoring session, keynote address. in *Proceedings of the Second World Congress on Engineering Asset Management and the Fourth International Conference on Condition Monitoring 2007, Harrogate, UK, 11-14 June 2007*.

#### Simple machines

- [36] McFadden P.D. 1987, Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1:173–183.
- [37] McFadden P.D. 1986, Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 108:165–170.
- [38] W. J. Wang and P. D. McFadden, Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection, *Journal of Sound and Vibration*, 192:927–939, 1996.
- [39] Randall R. B. A new method of modelling gear faults, *Journal of Mechanical Design*, 104:259–267, April 1982.
- [40] Randall R. B., Antoni J., and Chosaard S. The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15 (5):945–962, 2001.
- [41] Dalpiaz G., Rivola A. Rubini R. 2000. Effectiveness and Sensitivity of Vibration Processing Techniques for Local Fault Detection in Gears. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14(3), 387-412.
- [42] Rubini R., Meneghetti U. 2001. Application of the envelope and wavelet transform analyses for the diagnosis of incipient faults in ball bearing, *Mechanical System and Signal Processing*, 15(2), 287-302.

#### ICE applications: model-based techniques

- [43] Kimmich F., Schwarte A., Isermann, R. 2005. Fault detection for modern Diesel engines using signal and process model-based methods. *Control Engineering Practice*, 13, 189-203.
- [44] Chen J., Randall R., Automated diagnostics of internal combustion engines using vibration simulation, *Proceedings of Surveillance 2007, University of Technology of Compiègne*.
- [45] Azzoni P. M. 2004, Modellizzazione di un motore endotermico alternative per fini diagnostici, Università di - Bologna
- [46] Zhang J., 2015, Fault-diagnosis-approach-for-rotating-machinery-based-on-dynamic-model-and-computational-intelligence, *Measurement* (59) 73–87.

#### ICE applications: experimental techniques

#### **Non-parametrical methods – Time (Angular) domain**

- [47] Thomas J., Dubuisson B., Dillies-Peltier M. A. 1997, Engine Knock Detection from Vibration Signals using Pattern Recognition. *Meccanica*, 32, 431-439.
- [48] Molinaro F., Castanie F., 1995. Signal processing pattern classification techniques to improve knock detection in spark ignition engines, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 9(1), 51-62.
- [49] Klinchaeam S. e al., 2009, Condition Monitoring of a Small Four-stroke Petrol Engine using Vibration Signals, *KMITL Sci. Tech. J. Vol. 9 No. 1*.
- [50] S. Babu Devasenapati e al., 2010, Misfire identification in a four-stroke four-cylinder petrol engine using decision tree, *Expert Systems with Applications* 37 2150–2160.
- [51] Tse, P.W., Yang, W., 2010, EMD-based fault diagnosis for abnormal clearance between contacting components in a diesel engine, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24 193–210.
- [52] Li W., Gu F., Ball A. D., Leung A. Y. T., and Phipps C. E., 2001, A study of the noise from diesel engines using the Independent Component Analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing* 15(6) 1165-1184.
- [53] O. Niculita, S. Delvecchio, D. Zetu, Online diagnosis over internal combustion engines using visual dot patterns of vibration signals. in *Optimum technologic systems and materials in the machines building field*, TSTM- No.12 , Volume II (2006) ISSN 1224-7499, University of Bacau, Romania, 2006.
- [54] D. Zetu, O. Niculita, S. Delvecchio, Implementation of image matching correlation of symmetrized dot pattern of vibration signals in fault diagnosis cold test method for diesel engines. in *Optimum technologic systems and materials in the machines building field*, TSTM- No.12 , Volume II (2006) ISSN 1224-7499, University of Bacau, Romania, 2006.
- [55] O. Niculita, S. Delvecchio, D. Zetu, Effect of lag on the symmetrized dot pattern (SDP) displays of the vibration signal of diesel engines in Optimum technologic systems and materials in the machines building field, TSTM- No.12 , Volume II (2006) ISSN 1224-7499, University of Bacau, Romania, 2006.
- [56] S. Delvecchio, G. Dalpiaz, O. Niculita, A. Rivola, Condition monitoring in diesel engines for cold test applications. Part I: vibration analysis for pass/fail decision, in Ana C V Veira et oth. editors, *Proceedings of the 20th International Congress & Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, Faro, Portugal, 2007 June 13-15, pp.197-206.
- [57] S. Delvecchio, G. Dalpiaz, O. Niculita, A. Rivola, Condition monitoring in diesel engines for cold test applications. Part II: comparison of vibration analysis techniques, in Ana C. V. Veira et oth. editors, *Proceedings of the 20th International Congress & Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, Faro, Portugal, 2007 June 13-15, pp.197-206.
- [58] O. Niculita, D. Zetu, S. Delvecchio, Contribution regarding the link between total productive maintenance and product quality, in *Proceedings of International Conference "Modern Technologies, Quality and Restructuring-TMCR 2007"*, ISBN 978-9975-45-034-8, Chisinau, Moldova, May 31-June 3 2007.
- [59] O. Niculita, D. Zetu, S. Delvecchio, A methodology for diesel engines health monitoring, in *Proceedings of International Conference "Modern Technologies, Quality and Restructuring-TMCR 2007"*, ISBN 978-9975-45-034-8, Chisinau, Moldova, May 31-June 3 2007.

#### **Non-parametrical methods – Frequency domain**

- [60] Tomaszewski F., Szymanski M., Frequency Analysis of Vibrations of the Internal Combustion Engine Components in the Diagnosis of Engine Processes, *The Archives of Transport*, Vol. XXIV

#### **Non-parametrical methods – Ciclic domain**

- [61] Antoni J., Daniere J. and Guillet, G. 2002. Effective vibration analysis of ic engines using cyclostationarity. Part I-A methodology for condition monitoring, *Journal of Sound and Vibration*, 257(5), 815-837.
- [62] Antoni J., Daniere J. and Guillet G. 2002. Effective vibration analysis of ic engines using cyclostationarity. Part II- New results on the reconstruction of the cylinder pressures, *Journal of Sound and Vibration*, 257(5), 839-856.
- [63] Konig D., Boheme F., 1994. Application of cyclostationary and time-frequency signal analysis to car engine diagnosis. In *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*, Vol. 4, pp. 149-152.

#### **Non –parametrical methods- Time-frequency domain**

- [64] Mahjoob M. J., Zamanian A., 2006. Vibration Signature Analysis for Engine Condition Monitoring and Diagnosis. In *Proceedings of ISMA2006*, 18-20 September 2006 Leuven, Belgium.
- [65] Da Wu J., Chen Chen J. 2006. Continuous wavelet transform technique for fault signal diagnosis of internal combustion engines, *NDT&E International*, 39, 304-311.
- [66] Geng, Z., Chen, J., Barry Hull, J. 2003. Analysis of engine vibration and design of an applicable diagnosing approach, *International Journal of Mechanical Sciences*, 45, 1391-1410.

- [67] Tse, P.W., Yang, W., Tam, H. Y. 2004. Machine fault through an effective exact wavelet analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 277, 1005-1024.
- [68] Liu, B.e Ling, S. F., 1999. On the selection of informative wavelets for machinery diagnosis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(1), 145-162.
- [69] Vulli, S. ed al. Time-frequency-analysis-of-single-point-engine-block-vibration-measurements-for-multiple-excitation-event-identification *Journal of Sound and Vibration* 321 (2009) 1129–1143.
- [70] Bardou O., Sidhamed M., 1994, Early detection of leakage in the exhaust and discharge systems of reciprocating machines by vibration analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 8 (5), 551-570.
- [71] Delvecchio S. e alt., On the monitoring and diagnosis of assembly faults in diesel engines: a case study, in *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2009*, August 30-September 2, 2009, San Diego, California, USA.
- [72] Cavallari M., D’Elia G., Delvecchio S., Malago M., Mucchi E., G. Dalpiaz Condition monitoring by means of vibration analysis techniques: some case studies , in *U. Meneghetti, A. Maggiore and V. Parenti Castelli editors Memorie della Terza Giornata di Studio “Ettore Funaioli”*, Bologna, Italy, 2009 Luglio 19.
- [73] Cavallari M., D’Elia G., Delvecchio S., Malago M., Mucchi E., G. Dalpiaz On the use of vibration signal analysis for industrial quality control, in *Atti del XIX Congresso Aimeta 2009*, 14-17 Settembre 2009, Ancona, Italy.
- [74] Delvecchio S. e alt., Advanced Signal Processing Tools for the Vibratory Surveillance of Assembly Faults in Diesel Engine Cold Tests. *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, April 2010, Volume 132, Issue 2, 021008 (10 pages), DOI: 10.1115/1.4000807.
- [75] Delvecchio S., 2012, On the use of the wavelet transform for practical vibration condition monitoring issues, Open access book chapter in "*Advances in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology*", ISBN 978-953-51-0494-0.
- [76] Delvecchio S., 2013, On the use of vibration signal analysis for industrial quality control. Part II, Proceedings of CMMNO13, CONDITION MONITORING OF MACHINERY IN NON-STATIONARY OPERATIONS, Ferrara.
- [77] Bregant L. e al., Internal combustion engine analysis using EngineEnvelope (EE), Proceedings of ISMA2014, University of Leuven.

#### **Parametric methods**

- [78] Ettefagh M., Knock detection in spark ignition engines by vibration analysis of cylinder block: A parametric modeling approach, *Mechanical Systems and Signal Processing* 22 (2008) pp. 1495–1514.

#### **Acoustic Emission(AE)**

- [79] Lin, Tian Ran & Tan, Andy, 2011. Characterizing the signal pattern of a four-cylinder diesel engine using acoustic emission and vibration analysis. In Shen, Gongtian & Wu, Zhanwen (Eds.) *Proceedings of World Conference on Acoustic Emission -2011, Chinese Society for Non-destructive Testing*, Beijing International Convention Center, Beijing, pp. 506-515. Elamin F., 2013 Fault Detection and Diagnosis in Heavy Duty Diesel Engines Using Acoustic Emission. Doctoral thesis, University of Huddersfield.
- [80] Elamin F., 2010, Diesel Engine Injector Faults Detection Using Acoustic Emissions Technique, *Modern Applied Science* Vol. 4, No. 9; September 2010
- [81] Elamin, Fathi (2013) Fault Detection and Diagnosis in Heavy Duty Diesel Engines Using Acoustic Emission. Doctoral thesis, University of Huddersfield.

#### **Other approaches**

- [82] Geveci, M., Osburn, AW, Franchek MA 2005 An investigation of crankshaft oscillation for cylinder health diagnostics, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19 (5), 1107-1134.
- [83] Yang, J., Pu, L., Wang, Z., Zhou, Y. and Yan, X. 2001. Fault detection in a diesel engine by analysing the instantaneous angular speed, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(3), 549-564.
- [84] Li, H., Gu, F., Harris, G., Ball, A., Nick Bennettb, Travis, K., 2005, The measurement of instantaneous angular speed, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(2005), 786-805.
- [85] Gu, F., Yesilyurt, I., Lia, Y., Harris, G., Ball, A., 2006, An investigation of the effects of measurement noise in the use of instantaneous angular speed for machine diagnosis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(2006), 1444-1460.
- [86] Stander C., J., Heyns, P. J., 2005, Instantaneous angular speed monitoring of gearboxes under non-cyclic stationary load conditions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(2005), 817-835.
- [87] Bendat J. S., Piersol A. G., 1971, *Random data: analysis and measurement procedures*, Wiley, New York.
- [88] Shin K., Hammond J., 2008, *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*, Wiley.
- [89] Randall, R. B., 1987, *Frequency analysis*, Bruel & Kjaer.

- [90] Hammond, J. K., White, P. R. 1996, The analysis of non-stationary signals using time-frequency methods, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 190(3), pp. 419-447.
- [91] Antoni, J., Bonnardot, F., Raad, A., El Badaoui, M., 2004, Cyclostationary modelling of rotating machine vibration signals, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18(6), 1285–1314.
- [92] Pincus M., 1991, Approximation Entropy as a measure of system complexity”, in *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 88, pp. 2297-2301.
- [93] Yan R., Gao R. X., 2007, Approximate Entropy as a diagnostic tool for machine health monitoring, *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 824-839.
- [94] Taiyong W. et al., Machinery fault diagnosis based on chaotic oscillator and approximate entropy, in *Proceedings of the Second World Congress on Engineering Asset Management and the Fourth International Conference on Condition Monitoring 2007*, Harrogate, UK, 11-14 June 2007.
- [95] Wismer J., Time Domain Averaging Combined with Order Tracking, in *Application Note*, Bruel & Kjaer, Denmark.
- [96] Fyfe K. R., Munck D. S., Analysis of computed order tracking, *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 11(2), pp. 187-205.
- [97] Combet F., Gelman L. 2007, An automated methodology for performing time synchronous averaging of a gearbox signal without speed sensor, *Mechanical System and Signal Processing*, 21(2008), 2590-2606.
- [98] Halim B. et al., 2008, Time domain averaging across all scales: A novel method for detection of gearbox faults, *Mechanical System and Signal Processing*, 22(2008), pp. 261-278.
- [99] Mucchi, E., Vecchio, A., 2008, Acoustical signature analysis of a helicopter cabin in steady-state and run up operational conditions, *Proceedings of ISMA2008*, Leuven, Belgium, September 15-17.
- [100] Wu, J. D., Chuang, C. Q., 2005, Fault diagnosis of internal combustion engines using visual dot patterns of acoustic and vibration signals. *NDT&E International*, 38, 605-614.
- [101] Shibata, K., Takahashi, A., Shirai, T. 2000, Fault diagnosis of rotating machinery through visualisation of sound signal. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14(2), 229-241.
- [102] Gonzalez, R., Woods, R. and Eddins, S., 2004. *Digital Image Processing Using Matlab*. Prentice Hall.
- [103] Papoulis, A., 1962, *The Fourier Integral and its applications*. McGraw-Hill, New York.
- [104] Van der Auweraer, H., et al., 1992, “Spectral estimation of time-variant signal”, in *Proceedings of ISMA17 International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium, pp. 207-223.
- [105] Van der Auweraer, H., et al., 1992, “Analysis of non-stationary noise and vibration signals”, in *Proceedings of ISMA17 International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium, pp. 385-405.
- [106] Torrence, C., 1998, *A Practical Guide to Wavelet Analysis*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1).
- [107] Peng, Z.,K., Chu, F. L., 2003, Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography, *Mechanical Systems and Signal Processing* 18(2004), 199-221.
- [108] Newland, E., 1994, Wavelet Analysis, Part I: Theory, *Journal of Sound and Vibration* 116(1994), 409-416.
- [109] Newland, E., 1994, Wavelet Analysis, Part II: Wavelet Maps, *Journal of Sound and Vibration* 116(1994), 417-425.
- [110] Mallat, S., *A wavelet tour of signal processing*. Academic Press, 1999.
- [111] Lin, J., Zuo, M., J., 2003, Gearbox fault diagnosis using adaptive wavelet filter, *Mechanical Systems and Signal Processing* 17(6), 1259-1269.
- [112] Boulahbal, D., Golnaraghi M., F., Ismail, F., 1999, Amplitude and phase wavelet maps for the detection of cracks in geared systems, *Mechanical Systems and Signal Processing* 13(3), 423-436.
- [113] Baydar, N., Ball, A., 2003, Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform, *Mechanical Systems and Signal Processing* 17(4), 787-804.
- [114] Meltzer, G., Dien, N., P., 2004, Fault diagnosis in gears operating under non-stationary rotational speed using polar wavelet amplitude maps, *Mechanical Systems and Signal Processing* 18(2004), 985-992.
- [115] Wang, W., J., 1995, Application of orthogonal wavelets to early gear damage detection, *Mechanical Systems and Signal Processing* 9(5), 497-507.
- [116] Li, J., Ma, J., 1997, Wavelet decomposition of vibrations for detection of bearing-localized defects, *NDT & International* 30(3), 143-149.
- [117] Mahjoob, M. J., Zamanian, A., 2006. *Vibration Signature Analysis for Engine Condition Monitoring and Diagnosis*. In *Proceedings of ISMA2006*, 18-20 September 2006 Leuven, Belgium, pp. 885-895.
- [118] Da Wu, J., Qin Chuang, C., 2005. Fault diagnosis of internal combustion engines using visual dot patterns of acoustic and vibration signals. *NDT&E International* 38, 605-614.
- [119] Wang, W. J., McFadden, P. D., 1996, Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection, *Journal of Sound and Vibration*, 192:927–939, 1996.

- [120] Berri, S., Klosner, J., M., 1999, A new strategy for detecting gear faults using denoising with the orthogonal Discrete Wavelet Transform (ODWT), in Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, September 12-15, 1999, Las Vegas, Nevada.
- [121] Lin, J., 2001, Feature extraction of machine sound using wavelet and its application in fault diagnosis, *NDT & International* 34(2001), 25-30.
- [122] Smith, C., Akujuobi C., Hamory P., Kloesel K., 2006, An approach to vibration analysis using wavelets in an application of aircraft health monitoring, *Mechanical Systems and Signal Processing* 21(2007), 1255-1272.
- [123] D' Elia, G., 2008, Ph.D. Thesis in Applied Machines, Fault detection in rotating machines by vibration signal processing techniques, Universita' di Bologna, Italy.
- [124] Schukin, E.L., Zamaraev, R.U., Schukin, L.I., 2004. The optimization of wavelet transform for the impulse analysis in vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18, 1315-1333.
- [125] Yang, W., 2007. A natural way for improving the accuracy of the continuous wavelet transform. *Journal of Sound and Vibration*, 306, 928-939.
- [126] Tse, P., Yang W., Tam, H. Y., Machine fault diagnosis through an effective exact wavelet analysis, 2004, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 277(2004), 1005-10024.
- [127] Addison P. S., 2002, *The Illustrated Wavelet Transform Handbook*, Istitute of Physics Publishing, Philadelphia.
- [128] Delvecchio, S., Dalpiaz, G., Mucchi, E., 2007, Condition monitoring of marine couplings through vibration analysis techniques, in Proceedings of the Second World Congress on Engineering Asset Management and the Fourth International Conference on Condition Monitoring 2007, Harrogate, UK, 11-14 June 2007.
- [129] Yang W. 2008, Interpretation of mechanical signals using an improved Hilbert–Huang transform, *Mechanical Systems and Signal Processing* 22, 1061–1071.
- [130] Pachori, R. B., Sircar, P., A new technique to reduce cross terms in the Wigner Distribution. In *Digital Signal Processing*, 17:466–474, 2007.
- [131] Gardner, W. A., *Cyclostationarity in Communications and Signal Processing*, IEEE Press, 1994.
- [132] Bonnardot, F., Boustany, R., Ibrahim, A., Sabri, K., Antoni, J., El Badaoui M., Don't ignore non-stationarity: use it to advantage. In Proceedings of the ISMA 2006, Leuven, Belgium.
- [133] Randall, R. B., Antoni, J., Chobsaard, S., The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostic of bearing faults and other cyclostationary machine signals, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(5), 945–962.
- [134] Konig, D., Boheme, F., 1994. Application of cyclostationary and time-frequency signal analysis to car engine diagnosis. In Proceedings of IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, Vol. 4, 149-152.
- [135] Zouari, R., Antoni, J., Ille J. L., Willaert, M., Watremetz, M., Sidahmed, M., 2006. Cyclostationarity modelling of reciprocating compressors and application to valve fault detection. In Proceedings of the ISMA 2006, Leuven, Belgium.
- [136] Antoni, J., 2007, Cyclic spectral analysis in practise, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(2007), 597-630.
- [137] McCormick, A. C., Nandi, A., K., 1998, Cyclostationarity in rotating machine vibrations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12(2), 225–242.
- [138] Antoni, J., 2000, Ph.D. Thesis, Contribution of Angular Sampling and Cyclostationarity to the Vibration Analysis and Diagnosis of IC Engines. National Polytechnic Institute of Grenoble (in French).
- [139] Antoni, J., Randall, R. B., 2006, The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines, *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2) (2006) 308–331.
- [140] Vrabie, V. D., Granjon, P., Serviere, P., 2003, Spectral kurtosis: from definition to application, in IEEE-EURASIP, Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, Grado, Italy, 2003, June 8–11.
- [141] Vrabie, V. D., Granjon, P., Maroni, C., Benoit, L., 2004, Application of spectral kurtosis to bearing fault detection in induction motors, in Proceedings of Surveillance 5 Cetim, Senlis, October, 11-13 2004.
- [142] Antoni, J., 2006, The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals, *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 282–307.
- [143] Antoni, J., 2007, Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21 (2007) 108–124.

#### **4. Acoustic signal-based techniques**

##### **Nearfield acoustic signal analysis**

- [144] Randall R. B., 2002, State of the art in monitoring rotating machinery. Proceedings of ISMA2002, Leuven, Belgium, September 16-18, pp. 1457-1478.

- [145] Ahmaida A. e al., 2014, Gear wear acoustic monitoring acoustics signal, *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration*.
- [146] Li e al., 2002, Acoustic-based-condition-monitoring-of-a-diesel-engine-using-self-organising-map-networks, *Applied Acoustics* 63, 699–711.
- [147] Chiariotti P., 2013, Diagnostic of rotating machinery based on their acoustic signature, *Proceedings of AIA-DAGA 2013 Merano*.
- [148] L. Pruvost e al., 2009, Diesel engine combustion and mechanical noise separation using an improved spectrofilter, *Mechanical Systems and Signal Processing* 23, 2072–2087.
- [149] Antoni J. e al. 2004, Separation of combustion noise and piston slap in diesel engine by cyclic wiener filtering, *Proceedings of Surveillance 2004*, Cetim, Senlis.
- [150] J. Antoni, N. Ducleaux, S. Wang, Separation of Combustion Noise in IC Engines under a Cyclo-Non-Stationary Regime, *Proceedings of Surveillance 2007*, University of Technology of Compiègne.
- [151] Albarbar, A., 2010, Diesel-engine-fuel-injection-monitoring-using-acoustic-measurements-and-independent component-analysis, *Measurement* 43 (2010) 1376–1386.
- [152] Albarbar A., 2010, Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques, *Applied Acoustics* 71, 1132–1141.
- [153] Li W., Gu F., Ball A. D., Leung A. Y. T., and Phipps C. E., 2001, A study of the noise from diesel engines using the Independent Component Analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing* 15(6) 1165-1184;
- [154] Yadav S., 2010, Automatic Fault Diagnosis of Internal Combustion Engine Based on Spectrogram and Artificial Neural Network, *Proceedings of the 10th WSEAS Int. Conference on ROBOTICS, CONTROL and MANUFACTURING TECHNOLOGY*.
- [155] Yadav S., 2010, Condition monitoring of Internal Combustion Engine using EMD and HMM, *Intelligent Autonomous System Foundations and Applications*.
- [156] Wang Y.S., 2014, An intelligent approach for engine fault diagnosis based on Hilbert–Huang transform and support vector machine, *Applied Acoustics* 75, 1–9.
- [157] Albarbar A., 2010, Diesel Engine Air-borne Acoustic Signals Analysis Using Continuous Wavelet Transform, *Advances in Applied Acoustics (AIAAS) Volume 2 Issue 3*.
- [158] Da Wu J., Chen Chen J. 2006. Continuous wavelet transform technique for fault signal diagnosis of internal combustion engines, *NDT&E International*, 39, 304-311.
- [159] Figlus T., Condition monitoring of engine timing system by using wavelet packet decomposition of acoustic signal, *SAE paper*.
- [160] Li B., 2013, Classification of time-frequency representations using improved morphological pattern spectrum for engine fault diagnosis, *Journal of Sound and Vibration*, 332, 3329–3337.
- [161] Cheng Y. e al., 2012, Abnormal Noise Diagnosis of Internal Combustion Engine Using Wavelet Spatial Correlation Filter and Symmetrized Dot Pattern, *Applied Mechanics and Materials* Vol. 141 (2012) pp 168-173
- [162] Shibata K., Takahashi A., e Shirai T., 2000, "Fault Diagnosis of Rotating Machinery Through Visualization of Sound Signals," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 14, no. 2, pp. 229-241.
- [163] Da Wu, J., Qin Chuang, C., 2005. Fault diagnosis of internal combustion engines using visual dot patterns of acoustic and vibration signals. *NDT&E International* 38, 605-614.
- [164] Charles P., 2010, Application-of-novel-polar-representation-method-for-monitoring-minor-engine-condition-variations *Mechanical Systems and Signal Processing* (24) 841–843.
- [165] Frenne N., 2006, Acoustic time histories from vibrating surfaces of a diesel engine, *Applied Acoustics* 67 230–248.
- [166] Kanda H., 1990, Analysis of Noise Sources and Their Transfer Paths in Diesel Engines, *SAE International Congress and Exposition*.
- [167] Cerrato, 2009, Accessories, BSR, and Brakes, Sound and Vibration, *Automotive Sound Quality*.
- [168] Jiang, 2008, Monitoring-of-diesel-engine-combustions-based-on-the-acoustic-source-characterisation-of-the-exhaust-system *Mechanical Systems and Signal Processing* 22, 1465–1480.
- [169] Cook V., 2012, End-of-line inspection for annoying noises in automobiles: Trends and perspectives, *Applied Acoustics* 73 265–275.
- [170] Abid M. e alt., 2012, Tonal prediction of a faulty axial fan, *Applied Acoustics* 73 1022–1028.
- [171] Liu C. e al., 2010, Optimal design of acoustic performance for automotive air-cleaner *Applied Acoustics* 71 431–438.
- [172] Volandri G. e al., 2012, A psychoacoustic approach for sound quality assessment of automotive power windows, *Proceedings of ISMA-USD 2012*, Leuven.

### **Acoustic signal map-based techniques**

- [173] Cerrato G. e Goodes P., 2011, Practical Approaches to Solving Noise and Vibration Problem, *Sound and Vibration*.
- [174] Orman M. 2013, Acoustic analysis of electric motors in noisy industrial environment, *New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for Industrial Applications*.
- [175] Fedia M., Wavelet-based non-stationary near-field acoustical holography, *Applied Acoustics* 74 (2013) 1226–1233.
- [176] Lafon B., 2011, The concept of cyclic sound intensity and its application to acoustical imaging, *Journal of Sound and Vibration* 330 2107–2121.

## Tables

<b>Sources</b>	<b>Path</b>	<b>Noise emitter</b>
<b>Combustion</b> Rapid rate of change in-cylinder pressure (pulses)	Structure-borne – Engine block, engine head	Noise from manifold Vibration from engine block
<b>Mechanical</b> Mechanical impact, piston slap, bearings, valves, injection, fuel pump, belt/chain impacts, chain wear.	Structure-borne – Piston and cylinder connections	Noise from cover chain Vibration from engine block
<b>Aerodynamical</b> Exhaust, Intake duct leakages	Air-borne	Noise from intake, exhaust duct

**Table 1 - Sources and their generation mechanism, transmission path and last effect to receiver in ICE in diesel engines.**

<b>Sub-component ICE</b>	<b>Fault</b>
Injection system	Non correct injection times Non correct injection pressure Injector with wear
Pistons, cylinder, rods, ring	Misfiring <b>Knock</b> Faulty rubber ring <b>Piston slap</b> Bearing connecting rod with wear Loosing connecting rod bearing load
Lubrication system	Incorrect oil pressure Excessive oil temperature Oil contamination Faulty oil pressure
Intake/Exhaust lines	<b>Clearance within cam-distribution system</b> <b>Loosing in exhaust/intake manifold</b>
Distribution	Loosing chain belts
Bearings	<b>Distributed wear in bearingd</b> <b>Localized faults in rolling elements</b>
Auxiliares	Mass damper failure <b>Ventilation fan failure</b> <b>Turboshaft unbalance</b> <b>Turbocharger blade faults</b> <b>Whistle alternator noise</b>

**Table 2 – ICE typical ICE sub-system. Faulty condition affecting the vehicle interior comfort have been underlined.**

<i>Methodology</i>	<i>Technique</i>	<i>Feature</i>	<i>Selection algorithm</i>	
<b>Modelling mechanical system</b>	Experimental/Numerical correlation	Noise and vibration signals given by the model	Neural network	
<b>Experimental signal analysis (vibration – noise – Acoustic Emission)</b>	<b>NON-PARAMETRICAL METHODS</b>			
	Time domain	Temporal descriptor Envelope analysis Separation/Filtering techniques SDP Order analysis TSA	Parameter Bi-dimensional plot	Pattern recognition  Neural network  Fuzzy Logic
	Frequency domain	ICA	Parameter	Supported Vector Machine (SVM)
	Cepstral domain	Cepstrum	Parameter	
	Ciclic domain	Cyclostationarity	Parameter	
	Time/Frequency domain	STFT Wigner-Ville Distribution Wavelet (CWT, DWT) EMD (Empirical Mode Decomposition)	Bi-dimensional plot	Hidden Markov Model (HMM)
	<b>Sound quality (Acoustic signals)</b>		Parameter	
	<b>PARAMETRICAL METHODS</b>			
	ARMA			
	Neural network			

**Table 3 – Monitoring/diagnostic strategies with correspondent analysis techniques and selection algorithm.**

<i>Caratteristiche temporali del segnale</i>	<i>Tecnica</i>
Amplitude variation	Statistical analysis, Time-frequency analysis
Modulation	Envelope analysis Cyclostationary analysis
Tonal components	Frequency/order analysis TSA
Transient events	Spectral kurtosis
Intermittent events	Envelope analysis, Spectral kurtosis, Time-frequency analysis

**Table 4 – Signal analysis technique criteria based on temporal characteristics.**

<i>References</i>	<i>Components</i>	<i>Time-frequency</i>	<i>SDP and polar representation</i>	<i>Sound Quality</i>	<i>Acoustic maps</i>
[151][152][153][154][155][156][157][158][159][168]	ICE	X			
[160][161][162][163][164]	ICE		X		
[167]	Other vehicle components			X	
[169][170]Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.					X

**Table 5 – Acoustic signal techniques.**

<i>Techniques</i>	<i>Domain</i>	<i>Computational complexity</i>	<i>Online</i>	<i>Offline</i>
<b>Statistical analysis</b>	Time	Low	<b>X</b>	
<b>TSA</b>	Angle	Low	<b>X</b>	
<b>AppEn</b>	Time	Low	<b>X</b>	
<b>SDP</b>	Time	Medium		<b>X</b>
<b>FFT</b>	Frequency	Low	<b>X</b>	
<b>Cyclostationarity</b>	Ciclico	Low		<b>X</b>
<b>Spettral kurtosis</b>	Time	Medium		<b>X</b>
<b>STFT</b>	Time-Frequency	Medium		<b>X</b>
<b>EMD</b>	Time-Frequency	High		<b>X</b>
<b>WVD</b>	Time-Frequency	High		<b>X</b>
<b>CWT-DWT</b>	Time-Frequency	High		<b>X</b>
<b>Sound Quality</b>		High		<b>X</b>

**Table 6 – Non parametric signal analysis technique criteria based on implementation in monitoring systems.**

## Figures

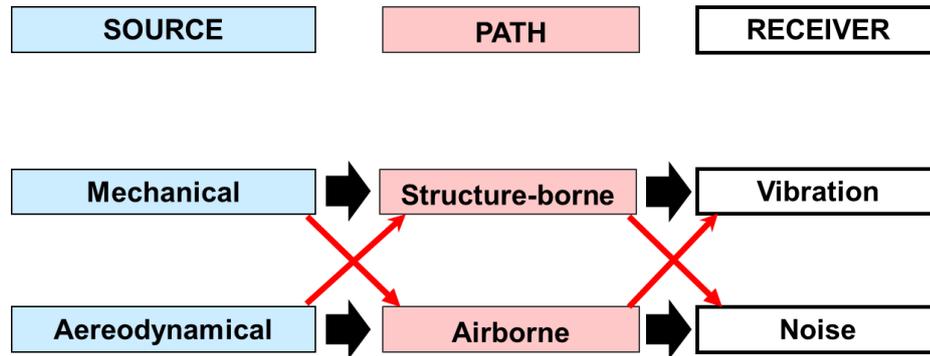


Figure 1 – Source-Path-Receiver model.

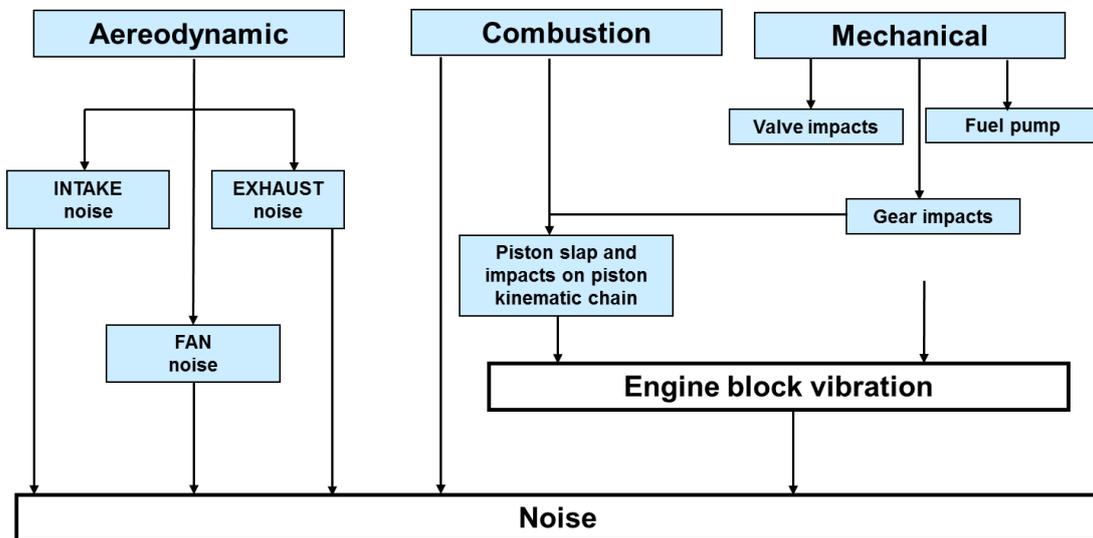


Figure 2 – Most relevant noise sources in ICE.

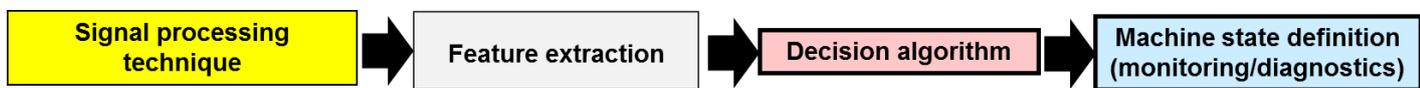


Figura 3 – Monitoring/diagnostics signal processing-based procedure.