

## CONTROLLO E DIAGNOSTICA DI UN SISTEMA DI PROVA INGRANAGGI PER APPLICAZIONI AERONAUTICHE

M. Amorena<sup>a</sup>, M. Barsanti<sup>b</sup>, M. Gubinelli<sup>b</sup>, F. Guzzo<sup>a</sup>, E. Manfredi<sup>a</sup>, M. Plancher<sup>c</sup>, M. Vitali<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della produzione, Università di Pisa, Via Diotisalvi, 2 – 56126 Pisa (PI), e-mail: [m.amorena@ing.unipi.it](mailto:m.amorena@ing.unipi.it)

<sup>b</sup> Dipartimento di Matematica Applicata, Università di Pisa, Via Bonanno Pisano, 25/B 56126 Pisa (PI), e-mail: [m.barsanti@dma.unipi.it](mailto:m.barsanti@dma.unipi.it)

<sup>c</sup> FIAT Aviazione S. p. A., Divisione Officine Meccaniche del Sangone, Strada Del Drosso, 145 – 10135 Torino (TO), e-mail: [Mario.Plancher@fiatavio.it](mailto:Mario.Plancher@fiatavio.it)

### SOMMARIO

In questo lavoro è descritta la realizzazione di un sistema di controllo e diagnostica per un banco prova ingranaggi (fig. 1), di tipo a ricircolo di potenza ed avente elevate prestazioni. L'attività sperimentale prevede la realizzazione di una campagna di prove per la caratterizzazione della resistenza di ingranaggi utilizzati in applicazioni motoristiche in campo aeronautico. Le prove saranno eseguite usando ruote dentate campione di opportuna geometria e realizzate con materiali innovativi. In particolare sono previste: prove di rottura per fatica dei denti (bending), prove di fatica superficiale (pitting) ed infine prove di usura adesiva o grippaggio (scuffing). Tale attività rientra nell'ambito di una collaborazione tra l'Università di Pisa e la FIAT Aviazione S.p.A. ed è in corso di svolgimento presso il laboratorio del Centro Ricerche sulle Trasmissioni Meccaniche a tecnologia avanzata (CRTM) del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione dell'Università di Pisa.



Fig. 1 - Banco prova ingranaggi

## **1. INTRODUZIONE**

Gli sviluppi sia dei materiali sia nelle tecnologie di produzione consentono di incrementare le prestazioni degli ingranaggi. Per sfruttare appieno questi miglioramenti è necessaria una misura, quanto più accurata possibile, delle prestazioni limite ottenibili, in modo da poter aggiornare i valori utilizzati nella progettazione. Il caso qui affrontato riguarda la determinazione di dati sperimentali adeguati per fissare i valori ammissibili di progetto (allowables) rispetto alle possibilità di rottura per fatica a flessione dei denti (bending), di danneggiamento per fatica superficiale (pitting) oppure per grippaggio (scuffing).

Le prove sperimentali saranno condotte riproducendo le condizioni di funzionamento in un impiego motoristico in campo aeronautico. In particolare si prevedono prove con diverse velocità di rotazione e diverse temperature e pressioni di ingresso olio. Le prove saranno inoltre condotte applicando le sollecitazioni meccaniche (Coppia torcente) secondo il criterio CRMRS descritto in [2] ed atto a determinare le prestazioni di cui sopra.

Ogni prova prevede l'impostazione di numerosi parametri alcuni strettamente legati alla prova (temperature, velocità, coppie agenti sull'ingranaggio test) ed altri relativi all'impianto di prova. In ogni prova è inoltre prevista l'acquisizione e la memorizzazione di numerosi parametri: in primo luogo: temperature, pressioni, velocità, cicli. Infine, in funzione dei valori assunti durante la prova da alcuni di questi parametri (es. temperatura di un cuscinetto) sono previsti allarmi e procedure di arresto, in modo da non arrecare danno all'apparecchiatura e di garantire un'adeguata sicurezza.

Principalmente per quest'ultimo motivo è stato necessario automatizzare il più possibile l'esecuzione di una prova. Per tale scopo è stato implementato un sistema di controllo nell'ambiente di programmazione LabView<sup>®</sup> che permette la conduzione da PC dell'intera prova. In particolare con tale sistema di controllo è possibile: impostare i dati di prova, monitorare in tempo reale tutti i principali parametri ed infine salvare su file tutti i dati acquisiti durante la prova.

Parallelamente al sistema di controllo è stato realizzato un sistema di monitoraggio e di diagnostica implementato in ambiente Matlab<sup>®</sup> il quale è in grado di acquisire ed elaborare in tempo reale i segnali provenienti da alcuni accelerometri posizionati sull'apparecchiatura di prova.

## **2. IL SISTEMA DI CONTROLLO**

Il sistema di acquisizione e controllo è stato implementato, nell'ambiente di programmazione LabView<sup>®</sup>, in modo da soddisfare le specifiche esigenze dell'apparecchiatura di prova. Nei paragrafi seguenti si procederà quindi alla descrizione della apparecchiatura di prova, dell'ambiente di programmazione ed infine dei programmi sviluppati.

### **2.2 L'apparecchiatura di prova**

La apparecchiatura di prova (Banco Ingranaggi) può essere idealmente scomposta in tre sottoassiemi principali: la sezione di prova (test), la sezione dei meccanismi di banco ed infine la sezione di attuazione rispettivamente del carico e della velocità. La sezione test contiene l'ingranaggio campione ed è alimentata da un circuito olio separato da quello che alimenta le altre unità del banco prova. Le prestazioni limiti ottenibili in questa sezione sono: velocità di rotazione massima 18000 giri al minuto (rpm), coppia torcente massima 500 Nm. In questa sezione è previsto che la temperatura dell'olio in ingresso possa raggiungere 180 °C. La sezione dei meccanismi di banco è composta da ingranaggi elicoidali che oltre a garantire il necessario rapporto di moltiplicazione permette l'applicazione della coppia torcente all'ingranaggio campione tramite un attuatore lineare fisso, come è descritto in [1]. Infine la sezione di attuazione è composta da un motore elettrico in corrente alternata,

comandato da un inverter vettoriale ad orientamento di campo, e da un servo-attuatore elettromeccanico; questi provvedono rispettivamente alla rotazione dell'ingranaggio in prova e all'applicazione di un carico assiale a generare la coppia torcente.

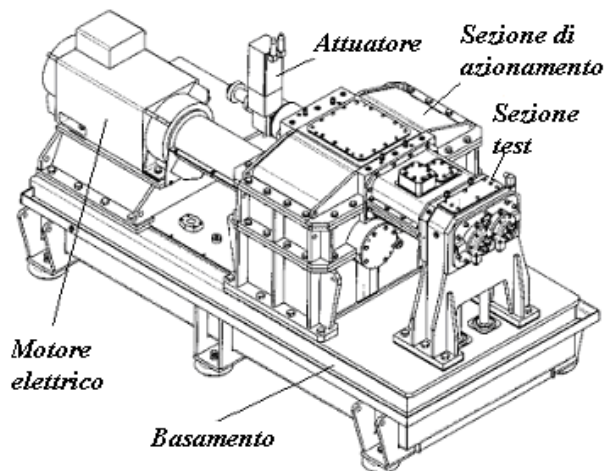


Fig. 2 - Configurazione del banco prova

Il sistema di prova è poi attrezzato con vari dispositivi di monitoraggio. In particolare sono presenti: misuratori di temperatura (termocoppie) misuratori di pressione e portate, un torsionmetro in grado di misurare la coppia sull'ingranaggio in prova, una sonda ottica per la misurazione dei cicli. Il numero complessivo di canali (segnali digitali, analogici ecc.) di ingresso e uscita gestiti dall'elaboratore è attualmente pari a 34.

La specifica del sistema di controllo prevedeva la realizzazione su un unico PC di:

- una interfaccia grafica semplice che permettesse di visualizzare, l'impostare ed il controllo dei parametri principali di una prova;
- memorizzazione automatica dei parametri più significativi separatamente per quelli di impianto e per quelli di prova;
- controllo dei parametri in funzione di valori limite predefiniti;
- implementazione di procedure automatiche di sicurezza.

### 2.1 Il linguaggio di programmazione LabView®

Il sistema di controllo è stato implementato nell'ambiente di programmazione LabView® (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Al contrario dei linguaggi di programmazione classici, per i quali l'esecuzione del programma (ossia l'esecuzione delle operazioni in essi descritte) è determinata dalle istruzioni, eseguite riga per riga, in LabView® l'esecuzione delle operazioni avviene secondo la logica del flusso di dati. Questo tipo di programmazione viene detto "G" (Grafica).

In LabView® è poi possibile, come negli altri codici, programmare a livelli o a sottoprogrammi creando quindi delle strutture, "dei pacchetti" che eseguono una serie di operazioni ed utilizzando questi pacchetti più volte nel codice.

### 2.3 Il sistema di controllo dell'apparecchiatura

Il sistema di controllo è composto da due strumenti virtuali (VI o Virtual Instruments) ossia da due programmi. Il primo, chiamato: IP (Impostazione Parametri), consente di impostare i principali parametri specifici della prova: coppia, temperatura, velocità di rotazione ecc. ; questi parametri oltre ad essere memorizzati in un file di testo diventano "variabili globali" che vengono successivamente utilizzate dal secondo VI chiamato CBI (Controllo Banco

Ingranaggi) il quale è attivato automaticamente alla chiusura del primo. Questo secondo VI risponde a tutti i punti della specifica del sistema di controllo.

Per l'acquisizione dei segnali (pressioni, velocità, corrente, ecc.) provenienti dal banco prova e per la generazione dei segnali di controllo del banco stesso si utilizzano due schede di acquisizione dati National Instruments®.

La tabella seguente riporta i parametri acquisiti o controllati dalla prima scheda di acquisizione dati. I segnali sono identificati con una sigla che contiene: un numero progressivo, la lettera (A) o (D) a seconda che si tratti di un segnale analogico o digitale e le espressioni IN o OUT per specificare se si tratta di segnali in ingresso o in uscita dal PC.

La seconda scheda acquisizione dati è collegata ad un modulo utilizzato per il condizionamento di 21 segnali proveniente dalle termocoppie posizionate sul banco prova, principalmente in prossimità dei cuscinetti.

Tab. 1 - Segnali in ingresso e in uscita dalla scheda acquisizione dati NI (6071E)

<b>Scheda acquisizione dati NI (6071E)</b>	
<b>Segnale</b>	<b>Parametro</b>
01 (A) IN	Velocità di rotazione del motore elettrico
02 (A) IN	Corrente assorbita dal motore elettrico
03 (A) IN	Pressione olio circuito sezione di azionamento
04 (A) IN	Portata dell'olio di alimentazione delle ruote test
05 (A) IN	Coppia delle ruote test
06 (A) IN	Numero di cicli compiuti dalle ruote test
07 (A) IN	Pressione dell'olio di alimentazione ruote test
08 (A) OUT	Riferimento di velocità per il motore elettrico
09 (A) OUT	Riferimento di posizione per il servo-attuatore
10 (D) OUT	Abilitazione inverter
11 (D) OUT	Arresto rapido motore
12 (D) OUT	Arresto rapido attuatore
13 (D) IN	Allarme accelerometri
14 (D) IN	Inizio acquisizione accelerometri
15 (D) IN	Allarme pressione olio circuito sezione di azionamento
16 (D) IN	Allarme livello olio serbatoio sezione di azionamento
17 (D) IN	Allarme temperatura olio serbatoio sezione di azionamento

### **2.3.1 Il VI IP (Impostazione parametri)**

Per automatizzare il più possibile l'esecuzione di una prova tramite il VI IP sono specificati, prima di iniziare la prova, le condizioni della stessa. I dati impostati vengono stampati per un controllo finale della congruenza con la specifica di prova e successivamente sono utilizzati dal VI CBI per portare automaticamente il banco nelle condizioni specificate. Il pannello frontale di questo VI si presenta come in fig. 3.

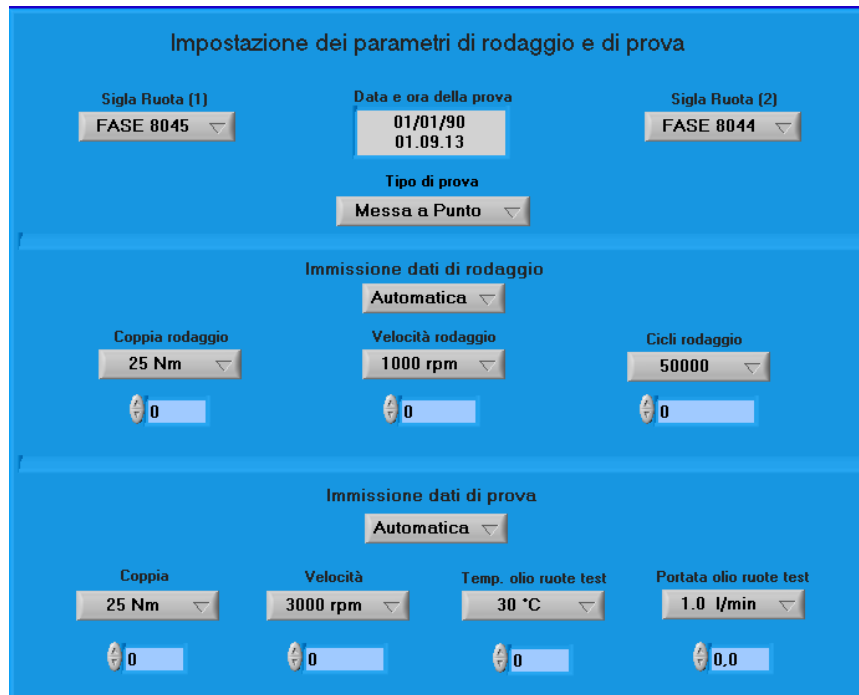


Fig. 3 - Pannello frontale del VI Impostazione Parametri

### 2.3.2 Il VI CBI ( Controllo Banco Ingranaggi )

Il VI CBI è il sistema di controllo vero e proprio del banco prova. Esso acquisisce inoltre temperature dei cuscinetti e della sala prova, pressioni, temperature e portate dell'olio in diversi punti dei due circuiti di alimentazione olio, corrente e velocità di rotazione del motore elettrico, coppia letta dal torsionometro e alcuni segnali digitali di allarme. Il pannello frontale con il quale l'operatore può gestire una prova si presenta come in fig. 4. Oltre alla possibilità di eseguire automaticamente le rampe di carico e velocità impostate nel VI IP tale programma permette di gestire completamente il motore elettrico e il servo-attuatore rendendo possibile quindi l'impostazione e la modifica delle velocità e coppie desiderate, in ogni momento della prova. Il sistema è inoltre retro-azionato e permette di impostare un valore di coppia desiderata e di mantenere la coppia nell'intorno del valore desiderato. Lo scostamento non supera il 2 % del valore previsto nelle prove. I transitori di carico e di velocità sono di regola realizzati automaticamente e l'operatore ha prevalentemente il compito supervisionare l'esecuzione della prova stessa.

Il monitoraggio dei parametri di prova è possibile sia attraverso indicatori digitali disposti sul pannello frontale sia attraverso la rappresentazione grafica della variazione nel tempo degli stessi, rappresentata a destra nella fig. 4.

Inoltre in qualsiasi momento è possibile scrivere commenti alla prova; tali commenti verranno memorizzati in un file come gli altri dati di prova.

Il sistema è stato inoltre realizzato in modo da permettere l'effettuazione di prove, che possono durare anche vari giorni, senza richiedere la costante attenzione dell'operatore. Perciò sono stati implementate alcune procedure di arresto automatico del banco come conseguenza del verificarsi di una determinata avaria del sistema.

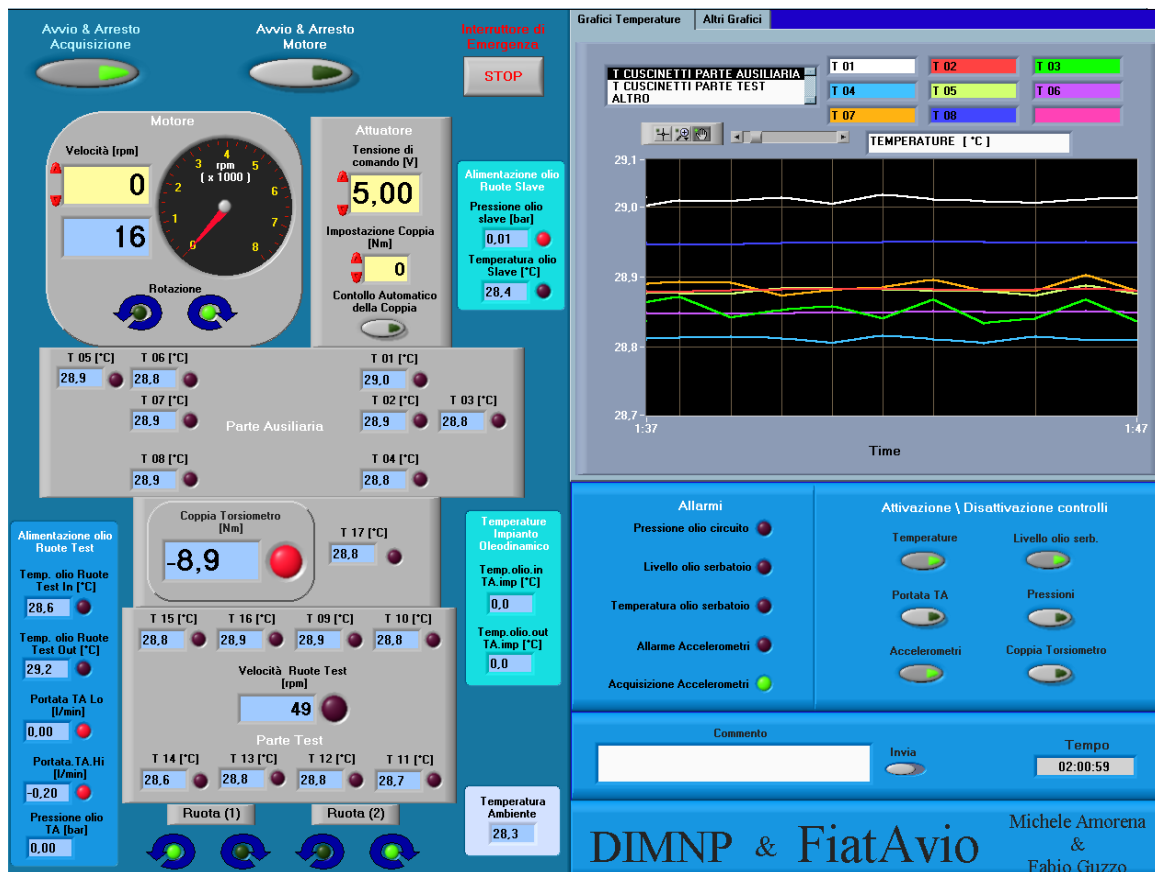


Fig. 4 - Pannello frontale del VI CBI

### 3. MONITORAGGIO E DIAGNOSTICA DELLE VIBRAZIONI

Durante l'effettuazione delle prove, allo scopo di rilevare il manifestarsi di rotture o di deterioramento superficiale è prevista la registrazione delle vibrazioni. Esse vengono rilevate posizionando opportunamente degli accelerometri. Quattro accelerometri monoassiali sono collocati in corrispondenza di opposti cuscinetti della sezione test oltre ad alcuni nella sezione dei meccanismi di banco; inoltre sono rilevati il segnale del torsiometro e la velocità angolare. Attualmente un ulteriore accelerometro è montato in prossimità del motore ed è previsto di acquisire, in futuro, un segnale acustico rilevato con un microfono.

#### 3.1 Modalità di acquisizione dati

I segnali analogici vengono digitalizzati da una scheda di acquisizione multiplexata che può acquisire 16 canali simultaneamente, alla velocità massima di 1,25 Mbit/s. Un opportuno programma in ambiente Matlab™ si incarica di gestire l'apertura dei canali che smistano il flusso di dati da acquisire, di impostare la corretta frequenza di campionamento e la durata dell'acquisizione, di memorizzare i dati su disco e di visualizzare in tempo reale alcune delle grandezze di interesse.

Poiché la velocità di rotazione massima è 18000 giri/min (300 giri/s) e le ruote hanno al massimo 80 denti, la frequenza di ingranamento massima è 24 kHz, e la frequenza di campionamento di almeno 50 kHz alla massima velocità angolare. Poiché i canali sono attualmente 12, vengono acquisiti 600000 campioni al secondo. Ciascuno di essi è memorizzato in un numero a 12 bit, quindi il flusso di dati è circa 1 Mbyte/s.

È ragionevole ritenere che ciascuna prova durerà circa 20 ore, quindi sarebbe necessario prevedere uno spazio di oltre 70 GB per la memorizzazione di tutta la prova su disco.

Una tale quantità di dati non può essere acquisita ininterrottamente, a meno di non voler utilizzare un disco rigido di elevata capacità per ogni prova effettuata. In realtà, una così grande mole di dati non è di fatto necessaria.

Lo scopo di tale acquisizione è infatti quello di rilevare qualche sintomo di una incipiente rottura della ruota per fenomeni di fatica prima che la rottura avvenga. Da quanto è noto in letteratura, questo tipo di rottura avviene in tempi molto rapidi (dell'ordine di alcuni minuti), quindi è sufficiente memorizzare l'ultimo quarto d'ora di prova dal momento in cui si rileva una anomalia nel funzionamento degli ingranaggi che costringe l'operatore a interrompere la prova.

Tale modalità di acquisizione viene realizzata con un'opportuna porzione di codice Matlab, in cui si scrivono in 2 files consecutivi A e B i dati riguardanti la registrazione di mezz'ora (1/4 d'ora in A e il 1/4 d'ora successivo in B) intervallati da una registrazione di durata 1 minuto. I files A e B vengono cancellati nella mezz'ora successiva, nel momento in cui vengono scritti quelli nuovi, quelli di durata più breve vengono mantenuti tutti. In questo modo è possibile caratterizzare il comportamento del sistema su lunghe durate e fare un'analisi più dettagliata degli ultimi minuti di prova registrati prima che venga rilevata l'anomalia di funzionamento. Questo sistema dovrebbe selezionare i criteri più affidabili per la rilevazione di anomalie di funzionamento in un sistema di segnalazione di guasti da installare a bordo degli aeromobili.

### **3.2 Metodologie di analisi dei dati**

Si descrivono alcune possibili metodologie, alcune delle quali già messe a punto, per l'analisi dei dati, sia durante l'acquisizione, che "fuori linea".

Per ridurre il rumore provocato da fenomeni casuali non correlati al problema da indagare, sarebbe opportuno effettuare delle medie temporali "sincronizzate", eseguite cioè in modo che l'inizio di ogni serie temporale di campioni corrisponda ad una stessa posizione angolare delle ruote.

In assenza di un dispositivo dedicato a sincronizzare l'inizio dell'acquisizione con una ben precisa posizione angolare si può considerare costante e nota la velocità angolare e, fissata la frequenza di campionamento, calcolare la durata e la dimensione in memoria di ciascuna delle tracce da mediare. Questo semplice metodo non è adeguato nel caso in cui ci siano fluttuazioni di velocità angolare.

Sarà implementata una seconda scheda di acquisizione per la misura del segnale tachimetrico per gestire la frequenza di campionamento della scheda madre da 16 canali. Si realizzerà così il campionamento sincrono con la possibilità di evidenziare e predire statisticamente la rottura di un singolo dente indicando la sua posizione esatta sulla ruota o di monitorare le vibrazioni prodotte dal periodico affacciarsi di due specifici denti appartenenti ciascuno alla rispettiva ruota in prova. Un secondo algoritmo che calcola lo scostamento di fase tra i canali dovuto al multiplexing della scheda, attualmente in sviluppo, permetterà di riallineare temporalmente i canali. Si consentirà dunque l'esecuzione di cross correlazioni per rilevare vibrazioni torsionali con accelerometri tangenziali.

#### **3.2.1 Analisi del campione statistico nel dominio del tempo**

Una prima informazione sul comportamento nel tempo delle ruote in prova può essere ricavata dalla stima di alcuni parametri che caratterizzano la distribuzione dei campioni acquisiti: media, mediana, moda, valori estremi e range, valore r.m.s., deviazione standard, momenti di ordine superiore (in particolare la curtosi), nonché da una visualizzazione della distribuzione di probabilità empirica dei campioni. Alcune grandezze comunemente usate nella diagnostica delle rotture a fatica, indicate in letteratura con sigle convenzionali (FM0, FM4, NA4, NA4\*, NB4, NB4\*) [5-7] sono legate al calcolo dei momenti (in particolare deviazione standard e curtosi) dei segnali direttamente provenienti dagli accelerometri,

eventualmente mediati in maniera sincrona e ricampionati in modo da avere sempre lo stesso numero di punti ad ogni giro. Tali grandezze possono essere facilmente ottenute con un'elaborazione in linea. La difficoltà principale, in tutti questi casi, consiste nella determinazione dei valori di soglia per queste quantità, al di sopra dei quali si ritiene che la ruota sia danneggiata. Prove di messa a punto, consistenti nell'impiego di ingranaggi danneggiati artificialmente possono essere utili a questo scopo. Inoltre, per una determinazione corretta di questi parametri, ottenibile mediando un numero ragionevole di campioni, occorre un segnale di sincronismo nell'acquisizione.

Un metodo per verificare se due insiemi di dati acquisiti in tempi diversi appartengono o no alla stessa distribuzione è il test di Kolmogorov-Smirnov [8]. Esso è un test non parametrico, quindi non è necessaria alcuna ipotesi sulla distribuzione di probabilità dei campioni, e può indicare una modifica nel tempo della densità di probabilità sperimentale. Creando una banca dati in cui si associa un dato tipo di distribuzione di probabilità ad un certo comportamento delle ruote sottoposte a fatica, è possibile classificare diversi tipi di malfunzionamenti, e creare un sistema automatizzato di rilevazione del tipo di guasto.

Il sistema attualmente in uso permette di visualizzare in tempo reale i valori r.m.s. e del crest factor dei segnali, e di fissare un livello di soglia in ciascuno dei canali acquisiti. Ci sono inoltre tre livelli di allarme. Se il valore r.m.s. di uno qualunque dei canali supera del 10% la soglia prefissata, viene visualizzato un primo avviso; se supera del 20% la soglia scatta un allarme ad indicare che sarebbe opportuno interrompere la prova per smontare le ruote e verificare se è visibile una qualche forma di danneggiamento. Se, infine, la soglia prefissata viene superata del 50%, scatta un arresto di emergenza che interrompe immediatamente la prova.

### ***3.2.2 Analisi del campione statistico nel dominio della frequenza***

Questo tipo di analisi utilizza metodi classici, correntemente usati per l'analisi di segnali deterministici, quali la trasformata di Fourier che per segnali digitali elaborati al computer viene realizzata implementando algoritmi Fast Fourier Transform (FFT). Si possono ottenere informazioni importanti sul comportamento meccanico delle ruote e segnali precursori della rottura tenendo sotto controllo l'ampiezza dello spettro alla frequenza di ingranamento [9] e controllando l'ampiezza relativa di eventuali bande laterali, che corrispondono a modulazioni prodotte da un difetto che si presenta ad intervalli di tempo regolari. Il codice Matlab attualmente in uso calcola in tempo reale le FFT dei segnali accelerometrici delle ruote test e del segnale di coppia e le mostra simultaneamente sulla parte sinistra del pannello, come riportato in fig. 7. evidenziando le frequenze caratteristiche.

Può essere interessante agire sul segnale campionato con un opportuno filtro digitale che possa isolare le ampiezze dello spettro corrispondenti a frequenze ben determinate (una volta nota la frequenza di rotazione e il numero dei denti) oppure che possa selezionare delle regioni spettrali per controllare l'ampiezza dello spettro di potenza nelle regioni "piatte" e l'insorgenza di rumore a largo spettro nelle bande prive di picchi. Naturalmente è possibile selezionare delle finestre temporali di durata opportuna e, dopo aver eventualmente applicato al segnale una finestra di convoluzione adatta (box, triangolare, Hamming, Hanning), ottenere una successione di trasformate di Fourier relative a intervalli di tempo consecutivi.

Un esempio di tale rappresentazione, detta "waterfall", ottenuta durante una prova a velocità angolare variabile, è mostrata in fig. 8 (rampa della velocità angolare in funzione del tempo) e 9 (waterfall delle FFT).

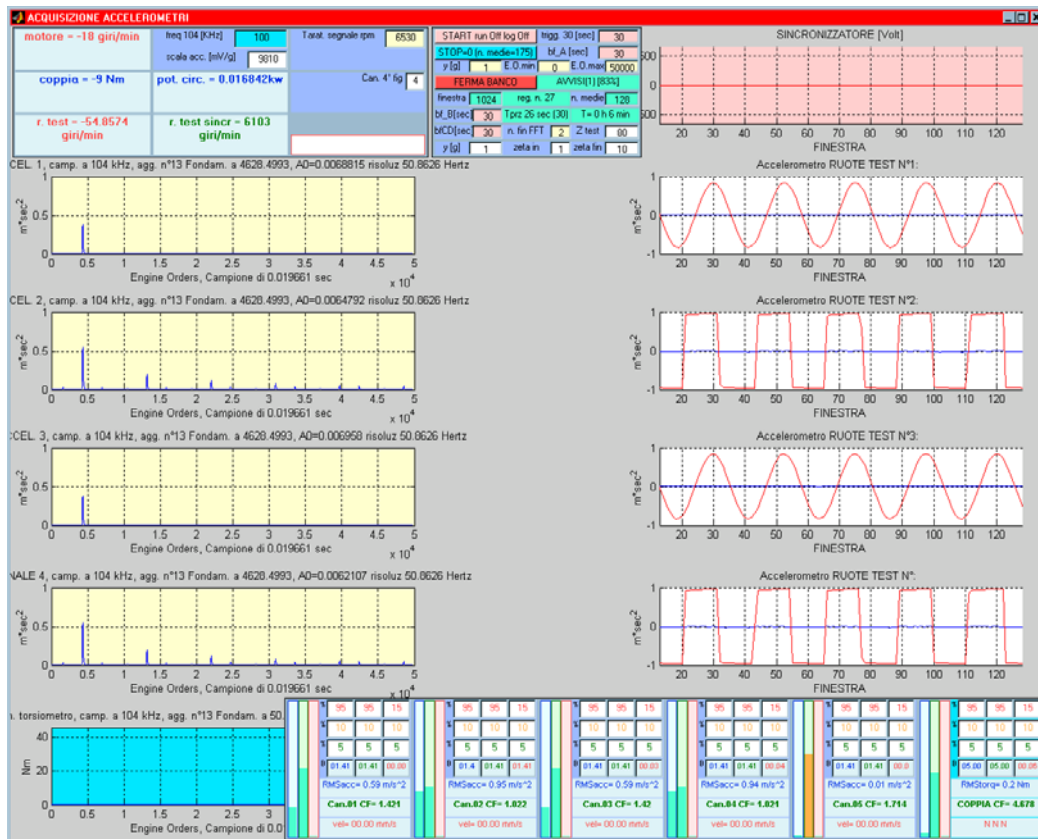


Fig. 7 – Pannello frontale del sistema di acquisizione accelerometri

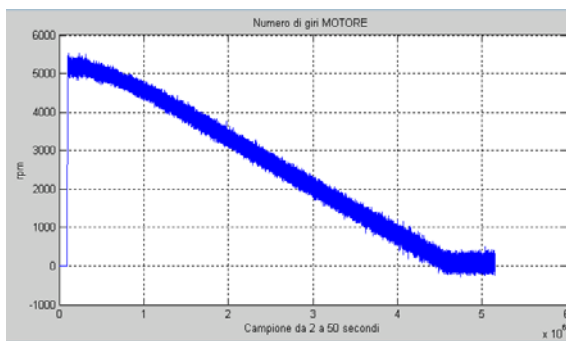


Fig. 8 - Velocità angolare in funzione del tempo

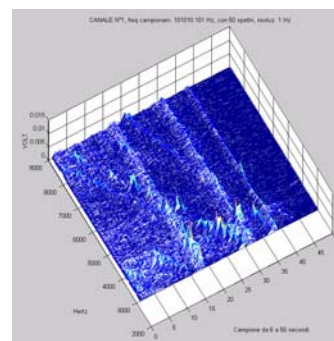


Fig. 9 – Waterfall delle FFT

Si possono utilizzare anche altri tipi di trasformate, anch'esse adatte all'analisi di segnali digitalizzati, quali la trasformata di Wigner-Ville [5,10] o altre distribuzioni tempo-frequenza. È possibile anche eseguire un'analisi in frequenza con tecniche stocastiche per la determinazione della densità spettrale di potenza. A questo proposito, il toolbox di analisi dei segnali presente in Matlab fornisce svariate metodologie già implementate. Il software sviluppato consente di sfruttare molte delle caratteristiche di Matlab per un'analisi in tempo reale dei segnali.

Informazioni importanti potrebbero anche essere ricavabili dalla trasformata wavelet [6]. In questo caso, poiché all'asse dei tempi corrisponde (a velocità angolare costante) la posizione dei vari denti, una variazione dell'ampiezza della trasformata wavelet potrebbe dare indicazioni sul cedimento di un ben determinato dente.

La progettazione del software di diagnostica in tempo reale deve tenere conto della mole di calcoli che debbono essere effettuati in tempi molto brevi. Ovviamente bisogna evitare di appesantire il codice ed eliminare i calcoli di grandezze che non portano informazioni utili

allo studio del fenomeno di rottura a fatica. L'individuazione delle grandezze realmente rilevanti a questo scopo è uno degli obiettivi di questo lavoro.

### **3.2.3 Sviluppo di un algoritmo per la predizione del comportamento del segnale**

Lo studio statistico della serie temporale dei valori di accelerazione potrebbe rendere possibile la progettazione di un algoritmo di calcolo (misto deterministico-stocastico) capace di prevedere il comportamento nel futuro (a breve termine) dalla conoscenza di un ragionevole numero di campioni acquisiti nel passato. Le capacità predittive di tale modello dovrebbero essere descritte da alcuni parametri, che vengono calcolati nuovamente quando l'algoritmo si accorge che lo scarto fra quanto il sistema è stato capace di prevedere e quanto è realmente avvenuto è divenuto troppo grande. È ragionevole ritenere che la variazione nel tempo dei parametri stimati dovrebbe essere abbastanza lenta, ma che dovrebbe divenire più rapida all'avvicinarsi di una rottura. Sono possibili varie tipologie di questi modelli: modelli Markoviani, modelli ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average), modelli basati su sistemi dinamici o su Equazioni Differenziali Stocastiche (SDEs).

## **4. CONCLUSIONI**

E' stato illustrato l'insieme di programmi, dedicati sia all'impostazione e controllo delle prove, sia all'acquisizione di segnali, sia al monitoraggio ed alla diagnostica, che sono stati realizzati tramite comuni software ed utilizzando due normali PC, per eseguire un impegnativo programma di prove su ingranaggi, su cui si era già riferito in precedenti Convegni.

Sono state evidenziati alcuni problemi, in particolare connessi con la implementazione di un efficace sistema di diagnostica, e sono stati indicati alcuni approcci che si intende seguire anche in vista di altre future applicazioni.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] G. L. Andrei, S. Manconi, E. Manfredi, M. Vitali, "Attrezzature per prove su ingranaggi ad alte prestazioni", *Atti del XXX Congresso AIAS*, Alghero 12-15.9.2001
- [2] M. Amorena, M. Barsanti, M. Gubinelli, E. Manfredi, I. Moretto, M. Vitali, Sull'impostazione di programmi di prove su ingranaggi, *Atti del XXXI Congresso AIAS*, Parma 18-21 Settembre 2002
- [3] National Instruments LabVIEW® USER MANUAL
- [4] Signal Processing Toolbox Matlab USER MANUAL
- [5] F.K. Choy *et al.*, Vibration Signature Analysis of a Faulted Gear Transmission System, *Journal of Propulsion & Power*, 12(2), 1996, pp.289-295
- [6] W.Q. Wang *et al.*, Assessment of Gear Damage Monitoring Techniques Using Vibration Measurements, *Mechanical Systems & Signal Processing*, 15 (5), 2001, pp.905-922
- [7] J.J. Zakrajsek, D.G. Lewicki, Detecting Gear Tooth Fatigue Cracks in Advance of Complete Fracture, *Tribotest Journal* 4-4, 1988, pp. 407-422
- [8] F.A. Andrade *et al.*, Gear condition monitoring by a new application of the Kolmogorov Smirnov test, *Proc Instn Mech Engrs*, 215 C , 2001, pp.653-661
- [9] P.D. McFadden Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of the Meshing Vibration, *Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, 108 (1986) pp. 165-170
- [10] V.V. Polyshchuk *et al.*, New Gear-Fault Detection Parameter by Use of Joint Time-Frequency Distribution *Journal of Propulsion & Power*, 16(2), 2000, pp.340-346