



# Le sfaccettature delle ruote ferroviarie

## Parte 2<sup>a</sup> - Sviluppo di un rilevatore

Dott. Ing. Andrea BRACCIALI (\*) - Dott. Ing. Gaetano CASCINI (\*) - Dott. Ing. Moreno PIERALLI (\*\*)

**SOMMARIO** – Nel presente lavoro viene illustrato lo sviluppo di un rilevatore di ruote sfaccettate, dal progetto alla realizzazione pratica, dalla taratura in laboratorio alla validazione in linea. In particolare, il rilevatore proposto utilizza sensori e tecniche di analisi innovative che lo rendono unico nel panorama internazionale, in termini di affidabilità di sistema, di capacità di rilevazione e di costo.

### Introduzione

Nell'articolo [1] vengono descritti la modellazione delle sfaccettature (in inglese *wheelflats*) ed i loro effetti su materiale rotabile, via ed ambiente.

Questi dati di ingresso sono fondamentali per la corretta progettazione di un rilevatore che possa competere con successo sul mercato. Un'analisi preliminare dei prodotti disponibili ha mostrato, come meglio descritto nel seguito, come essi siano notevolmente complessi (elevato numero di trasduttori, con conseguente bassa affidabilità globale e costo elevato) e richiedano postazioni di misura *ad hoc* con elevati costi di installazione e manutenzione.

La Siliani Elettronica ed Impianti S.p.A. di Firenze ha collaborato con il Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali nella ricerca relativa allo sviluppo di un nuovo rilevatore, denominato *wheelflat detector (WFD)*. Lo studio di fattibilità, verificata la possibilità tecnica, ha portato, attraverso lo sviluppo di una serie di prototipi intermedi ed a campagne di prova in laboratorio ed in linea i cui oneri finanziari sono stati integralmente sostenuti dalla Siliani, alla definizione della configurazione finale descritta nel presente lavoro.

### 1. Considerazioni preliminari

La diagnostica delle ruote sfaccettate si rivela essere fondamentale:

- quando interessi conoscere, per motivi di salvaguardia della propria rete nazionale, lo stato dei convogli in transito dalle frontiere (questo problema diviene sempre

più importante per i criteri di interoperabilità che oggi informano tutte le reti europee);

- quando si debbano proteggere linee di uso promiscuo viaggiatori/merci ma nelle quali la qualità del tracciato rivesta particolare importanza per la velocità o la qualità del servizio svolto, quand'anche queste fossero interessate da solo traffico interno (ad esempio le linee ad alta velocità);

- quando l'efficienza dei sistemi antipattinanti sui veicoli viaggiatori, formalmente tali da impedire il bloccaggio delle ruote e quindi la nascita di sfaccettature, sia degradata portando a convogli con sfaccettature non compatibili;

- quando, per ragioni di economicità dell'esercizio, si riveli essenziale la "riparazione" (ritornitura) del veicolo con le sale sfaccettate onde evitare guai maggiori alle rotaie, alle ruote ed alle boccole oltre ad un maggior impatto ambientale.

Tutti i rilevatori di ruote sfaccettate sono basati sul principio di un controllo di soglia di una grandezza fisica, tipicamente il rumore o le accelerazioni misurate sul binario, che, se viene superata in un qualunque istante, porta alla comparsa di un allarme che viene inviato ed opportunamente processato da un posto remoto. Per garantirsi che la sfaccettatura "cada" in prossimità di un trasduttore, normalmente se ne usano parecchi (fino ad 8 per rotaia) distribuiti su una lunghezza pari alla circonferenza della ruota di diametro più grande che si vuole controllare (il diametro delle ruote delle locomotive moderne è normalmente intorno a 1200÷1300 mm e quello delle vetture è intorno a 850÷950 mm). Questo controllo di soglia, di per sé molto semplice, si rivela decisamente inefficace, sia per gli inevitabili costi (16 accelerometri per installazione permanente all'aperto non hanno costo trascurabile) che per l'affidabilità generale del sistema che risulta decisamente ridotta. Inoltre non è possibile tentare una classificazione delle sfaccettature, essendo un con-

(\*) Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali – Università di Firenze.

(\*\*) Siliani Elettronica ed Impianti S.p.A. - Firenze.

## SCIENZA E TECNICA

trollo di soglia, per definizione, molto semplice ma molto grossolano.

Scopo della ricerca è stato quindi l'individuazione di un dispositivo che potesse ridurre la complessità ed il costo complessivo dell'installazione del rilevatore, agendo sia sul trasduttore che sull'algoritmo di rilevazione e quantificazione del danneggiamento.

### 2. Descrizione del sensore usato

I sensori utilizzati nella diagnostica delle sfaccettature sono gli estensimetri elettrici a resistenza (*strain gauges*) per la misura delle deformazioni delle rotaie e delle traverse, gli accelerometri per la misura delle vibrazioni delle rotaie ed i microfoni, anche se questi ultimi non vengono normalmente considerati sufficientemente robusti per l'impiego in campo ferroviario.

L'uso degli estensimetri, benché ben documentato ed affidabile, risente del problema intrinseco che questo tipo di trasduttore misura le deformazioni (legate quindi agli spostamenti) che, ovviamente, sono l'integrale doppio delle accelerazioni. In tal modo il sistema agisce come filtro passa-basso: urti a distanza di oltre 3 m non sono normalmente fonte di deformazioni apprezzabili dall'estensimetro, e questo impedisce il loro uso in un sistema che voglia utilizzare i segnali degli urti più lontani combinandoli per ottenere un indicatore sufficientemente stabile ed efficace.

Gli accelerometri, dal canto loro, consentono, con il tipo piezoelettrico, di rilevare correttamente accelerazioni fino a qualche migliaio di g, anche se, essendo in carica, non consentono di misurare carichi statici, per cui il loro segnale non è in alcun modo correlato al peso dell'asse in transito.

Dopo una approfondita ricerca sulla sensoristica disponibile sul mercato, è stato individuato il cavo piezoelettrico [2]. Esso è costituito da un normale cavo coassiale nel quale l'effetto piezoelettrico, ovvero la nascita di cariche elettriche fra calza e conduttore interno derivante da sollecitazioni meccaniche, è massimizzato anziché minimizzato grazie alle particolarità chimiche dell'isolante interno. Questo tipo di sensore è largamente utilizzato, ad esempio quale elemento di sicurezza anti-intrusione negli aeroporti, e presenta le seguenti caratteristiche, decisamente interessanti per l'impiego ferroviario:

- è particolarmente robusto ed adatto all'impiego continuativo in ambienti esterni (*range* di temperatura  $-40^{\circ}\text{C}/+125^{\circ}\text{C}$ ), anche in presenza di raggi ultravioletti (luce diretta del sole);
- l'elettronica di alimentazione e condizionamento è particolarmente semplice (amplificatore di carica);
- è elettricamente isolato dall'esterno e quindi anche dalla rotaia, prevenendo potenziali problemi al sistema di

segnalamento ed i disturbi dovuti al ritorno delle correnti di trazione;

- come verificato durante misure preliminari di confronto effettuate con accelerometri triassiali, l'effetto delle sfaccettature sulle vibrazioni della rotaia è principalmente in direzione verticale e longitudinale e, in misura minore, laterale; la buona sensibilità del cavo in tutte le direzioni rende più robusta l'identificazione delle sfaccettature;

- la sensibilità non è influenzata dall'invecchiamento;
- ha costo molto ridotto.

L'applicazione del cavo piezoelettrico allo scopo della ricerca non è tuttavia banale, dato che la risposta del sensore agli alti livelli di accelerazione tipici degli impatti dovuti alle sfaccettature non è riportata nei dati forniti del produttore. Tests di laboratorio sono stati effettuati su diversi campioni di cavo piezoelettrico, confrontando la loro risposta con accelerometri di misura standard, nelle seguenti condizioni (fig. 1):

- a) controllo della linearità e della dinamica del cavo montato su una tavola vibrante elettrodinamica;
- b) verosimiglianza della risposta del cavo e di diversi accelerometri montati su uno spezzone di 3.6 m di rotaia UIC 60 sospesa su vincoli elastici;
- c) verifica della risposta sul binario a forze impulsive.

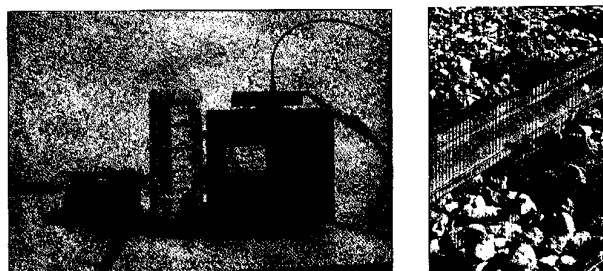


Fig.1 - Calibrazione per confronto con accelerometri di misura (a sinistra) e prove preliminari su un tronchino interno allo stabilimento Siliani (a destra).

Il cavo ha superato tutti i tests; è utile ricordare come l'autospettro di potenza [4] del segnale accelerometrico misurato al passaggio dei treni abbia una dinamica di circa 20 dB, mentre il fabbricante garantisce il cavo piezoelettrico per una dinamica di oltre 200 dB.

L'applicazione del cavo sulla linea ferroviaria durante il normale esercizio impone, ai fini di una corretta identificazione delle sfaccettature, che siano verificate alcune condizioni ottimali:

- la velocità dei convogli deve essere il più possibile costante, evitando in ogni modo frenature che introducono vibrazioni elevate, specialmente se a ceppi;
- la velocità dei convogli deve essere nel *range* 30÷100 km/h per massimizzare l'effetto delle sfaccettature sulle accelerazioni del binario (a velocità più alte diviene pre-

## SCIENZA E TECNICA

valente l'effetto delle vibrazioni dovute alla normale rugosità ruota-rotaia e le sfaccettature tendono a "volare" sulla rotaia);

- il sensore deve essere lungo al massimo qualche centimetro.

Riguardo a quest'ultimo punto, tests sono stati condotti con cavi lunghi fino a 2.5 m, con l'intento di ottenere un picco nel segnale corrispondente all'urto sulla rotaia. Dato che la velocità di propagazione dei vari tipi di onde elastiche nell'acciaio è di circa 5 km/s, a 2500 Hz la lunghezza d'onda è di 2 m, per cui un cavo lungo non ha minimamente la possibilità di misurare questo tipo di frequenze. Sostanzialmente quindi la lunghezza del cavo regola la frequenza di taglio passa-basso del cavo; per poter apprezzare correttamente i contributi alle frequenze più alte, così importanti nei fenomeni impulsivi quali gli urti, occorre utilizzare cavi della minima lunghezza purché, ovviamente, dotati della sensibilità sufficiente.

### 3. L'algoritmo di detezione con l'uso del Cepstrum applicato a segnali accelerometrici

Normalmente una sola sfaccettatura è presente su una ruota difettata, per cui gli impatti si susseguono a distanza di circa 3 m. Il binario è, per sua natura di trave su suolo elastico con appoggi concentrati, fortemente smorzato, per cui l'attenuazione del segnale alle varie frequenze va da 1 a 5 dB/m. Quando la ruota passa su un sensore il contributo dovuto alla rugosità ruota-rotaia può pertanto essere ben maggiore di un impatto che, nella peggiore delle ipotesi, avviene a 1.5 m dal sensore stesso. Proprio per evitare questo problema, ossia la mancata rilevazione del segnale, i sistemi attuali, basati su un controllo di soglia, necessitano di più di un sensore. Utilizzare una soglia molto alta, infatti, evita la falsa segnalazione di ruote rugose (senza sfaccettature) ma impedisce di individuare impatti lontani, mentre soglie basse consentono di identificare impatti lontani ma, presumibilmente, danno luogo ad un alto numero di falsi allarmi.

L'algoritmo inizialmente sviluppato è fondato sulla comune esperienza che una persona, anche non partico-

larmente qualificata o addestrata, è in grado di riconoscere la presenza anche di una sola sfaccettatura in un intero convoglio e questo è, di fatto, l'unico controllo preliminare che viene effettuato dal personale viaggiante ed a terra prima delle periodiche manutenzioni cui ogni rotabile è soggetto.

L'orecchio umano è in grado infatti non tanto di identificare i livelli di rumore quanto *le ripetizioni*, che sono la vera peculiarità del rumore provocato dalle sfaccettature, anche se di livello più basso del rumore globale.

Una funzione di uso comune nell'analisi dei segnali campionati, il *Power Cepstrum* o più semplicemente *Cepstrum*, è stata introdotta da Bogert *et alii* [3] per individuare gli echi di origine sismica; il suo nome deriva dal fatto che essa è simile all'inverso dello spettro di potenza (*spectrum*  $\Rightarrow$  *cepstrum*). La definizione originale del *Cepstrum* (molte equivalenti sono state formulate successivamente) è "lo spettro di potenza del logaritmo dell'autospettro di potenza del segnale". Nell'impostazione iniziale del lavoro è stata usata una definizione lievemente diversa, utilizzando la trasformata inversa di FOURIER (IFFT) anziché la trasformata diretta (FFT); a parte un fattore di scala, l'approccio utilizzato consente di confrontare il *Cepstrum* ottenuto con la funzione autocorrelazione  $R_{xx}(t)$

$$C_x(\tau) = |\mathcal{F}^{-1}(\log(S_{xx}(f)))|^2 \quad (1)$$

$$R_{xx}(t) = \mathcal{F}^{-1}(S_{xx}(f)) \quad (2)$$

L'analogia fra queste due formule è evidente; la variabile indipendente  $\tau$ , detta *queffreny*, è dimensionalmente un tempo ed è simile alla variabile indipendente dell'autocorrelazione. Per un'introduzione generale e le proprietà delle funzioni *Cepstrum* si rimanda a [4].

La prima applicazione è stata effettuata su segnali accelerometrici raccolti durante una campagna prove effettuata nel gennaio 1996 e mirata alla caratterizzazione del binario ed alla ricostruzione delle forze ruota-rotaia ad alta frequenza [5,6,7]. La posizione degli accelerometri utilizzati è mostrata in fig. 2; l'accelerometro utilizzato per il calcolo del *Cepstrum* è stato quello verticale in cor-

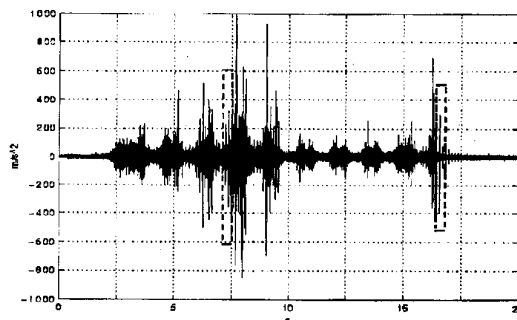
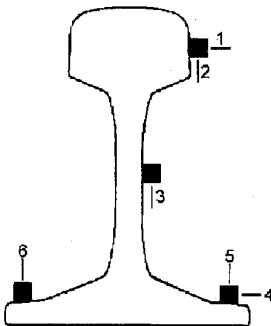


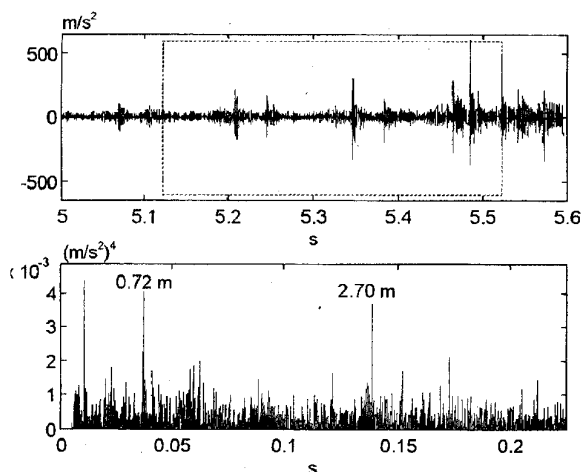
Fig. 2 - Posizione degli accelerometri sulla sezione della rotaia (sinistra). Accelerazione misurata  $a_{x(t)}$  per un treno Interregionale (E646, 1 bagagliaio, 3 vetture 1° classe, 4 vetture 2° classe, 1 sempilota). In linea tratteggiata le regioni nelle quali il *Cepstrum* supera una soglia predefinita.

rispondenza della testa della rotaia (n° 2); questa posizione è poi diventata quella di riferimento in tutte le prove successive effettuate, per cui nel prosieguo del lavoro le accelerazioni misurate in tale posizione verranno identificate con  $a_{ref}$ .

Si è notato come i segnali derivanti dal passaggio di materiale rotabile diverso forniscano valori energetici di accelerazione marcatamente diversi in funzione della velocità, del peso e del tipo di frenatura (ceppi o dischi); a titolo di esempio le automotrici ALn 668, che pure non hanno mai presentato sfaccettature, danno valori di accelerazione delle rotaie molto elevati.

Quale indicatore dell'energia contenuta nel segnale è stata utilizzata la funzione covarianza, che normalizza rispetto al numero N dei campioni la somma dei quadrati  $s^2$  degli stessi secondo la

$$COV_s = \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{N-1} \text{ dove } s_i = s(i \cdot \Delta t) \text{ con } i=1,2,\dots,N \quad (4)$$



*Cepstrum* è stata valutata su segmenti di segnali più lunghi, con un numero N di campioni potenza di 2 per motivi di velocità di calcolo (in questo caso si parla propriamente di FFT - Fast Fourier Transform), per poter contenere almeno 3 rivoluzioni complete delle ruote e quindi 4 urti (minimo 9 m).

In fig. 3 sono mostrati alcuni esempi di rilevazione di difettosità locali mediante l'uso del *Cepstrum*; per ulteriori dettagli il lettore è rimandato a [8], mentre per quanto riguarda le proprietà statistiche dei segnali di accelerazione rilevati per numerosi treni si veda [9].

#### 4. Prime applicazioni del cavo piezoelettrico

Il cavo piezoelettrico è stato montato, in una prima campagna prove svoltasi presso la stazione di Le Sieci (Fi) nell'aprile 1997, su blocchetti in alluminio di lunghezza 70 mm fresati per accogliere il cavo che vi è stato incollato lasciando 5 mm di distanza fra i blocchetti, i quali sono stati poi incollati al binario (fig. 4). Il cavo, di lunghezze pari a 2.5, 1, 0.1 e 0.05 m, aveva

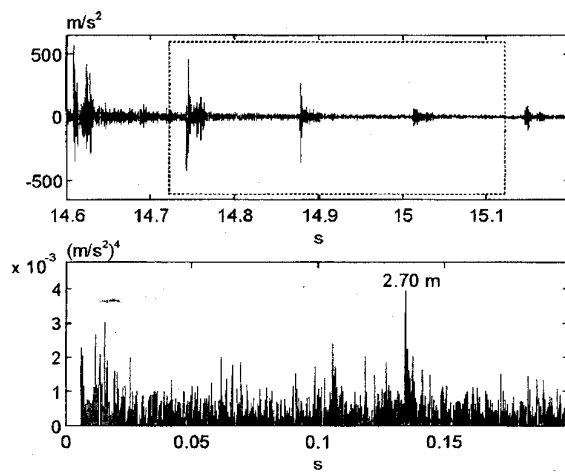


Fig. 3 - Primo (a sinistra) e secondo (a destra) segmento del segnale  $a_{ref}$  del treno Interregionale dove la soglia di *Cepstrum* viene superata (in alto); *Cepstrum* dei segmenti (in basso). Sono ben visibili nei segnali le ripetizioni dovute agli urti delle sfaccettature; il primo carrello presenta una sala con due sfaccettature e difettosità globali, l'ultimo ha una sala con una sola sfaccettatura (solo difettosità locali). Le distanze equivalenti sono indicate sui picchi di *Cepstrum*.

Per segnali campionati a media nulla (gli accelerometri piezoelettrici utilizzati non sono in grado di misurare accelerazioni costanti) la covarianza rappresenta l'energia media del segmento. L'analisi è stata compiuta, in mancanza di un riferimento preciso delle posizioni degli assi in transito, ricorrendo ad *overlap* abbastanza elevati (87.5%) per avere una buona stabilità dei risultati, utilizzando un numero variabile di campioni N corrispondente alla distanza percorsa di 1 m. La frequenza di campionamento è di 20480 Hz per canale, filtrata passa-basso a 4 kHz. La funzione

pertanto una superficie libera (non risultando vincolato da ambo le parti) e soggetto quindi prevalentemente alle sole azioni inerziali. È stato possibile osservare in questa campagna prove come la lunghezza del cavo avesse importanza fondamentale. In questa campagna prove, effettuata *ad hoc*, è stato utilizzato per la prima volta un sistema, divenuto poi standard per le campagne prova successive, per la corretta localizzazione ed individuazione delle ruote e della velocità dei convogli basato su due pedali contaassi di produzione Siliani.

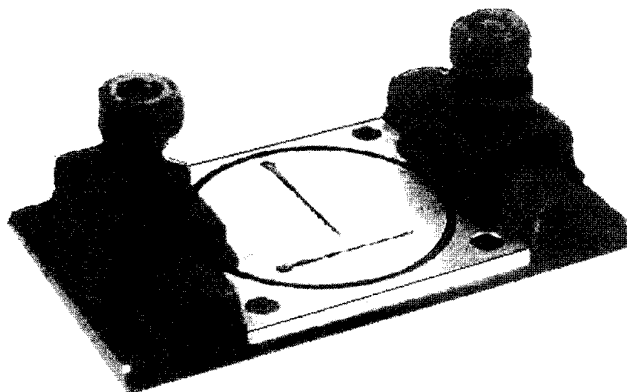
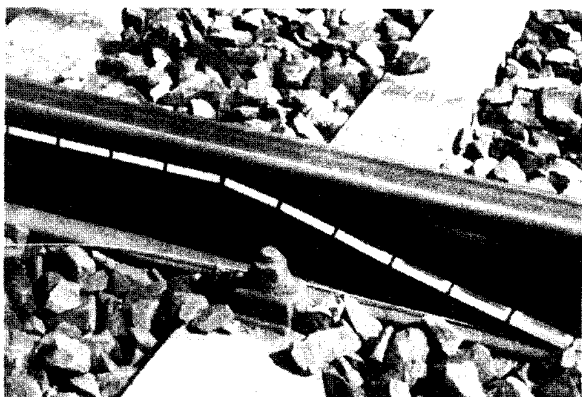


Fig. 4 - A sinistra: montaggio del cavo piezoelettrico. A destra: il prototipo presentato in occasione del WCRR '97.

In occasione del convegno WCRR '97 sono stati presentati i risultati ottenuti a Le Sieci [10] ed è stato presentato un prototipo di rilevatore ottenuto da una piastra per il fissaggio delle rotaie UIC 60 alle traverse (fig. 4). La piastra è stata alleggerita e fresata centralmente; vi sono state ricavate scanalature trasversali e longitudinali per l'alloggiamento del cavo piezoelettrico di lunghezza limitata (50 mm) ed è stato applicato un O-ring di protezione.

Benché l'applicazione di un'attrezzatura di questo tipo appaia estremamente razionale e rapida ed il costo sia decisamente ridotto, una campagna prove svolta nel febbraio 1998 presso il PL presente sulla tratta Firenze SMN - Firenze Campo Marte (binario pari) ha mostrato i limiti di tale montaggio. Come noto infatti dalla letteratura [11], la sezione della rotaia si deforma, nel piano che la contiene, al di sopra di circa 1 kHz. La rigidità flessionale della piastra è talmente elevata che trasmette quasi integralmente ai sensori posti sotto l'anima le vibrazioni delle ali della rotaia, che hanno un'ampiezza notevole rispetto al movimento complessivo della rotaia e pertanto contaminano in maniera irreversibile i segnali raccolti anche alle frequenze più basse.

### 5. Il secondo prototipo di WFD

#### 5.1. Descrizione generale

Viste le limitazioni del primo tipo di rilevatore, durante l'estate 1998 è stato progettato e realizzato un supporto del cavo atto ad eliminare i problemi descritti. Esso consiste, sostanzialmente, in una molla a lamina opportunamente sostenuta alle estremità che applica un precarico ad un blocchetto centrale nel quale, longitudinalmente, è posto lo spezzone di cavo piezoelettrico (fig. 6). Peculiarità di questa installazione è proprio il pre-

carico del cavo che lo rende maggiormente solidale alle deformazioni elastiche della sola porzione della suola della rotaia sull'asse oltreché alle accelerazioni nelle varie direzioni. Il prototipo è stato presentato al convegno CIFI di Napoli di novembre 1998 [12]; la sua conformazione consente il montaggio rapido ed autocentrante ad un solo operatore. L'utilizzo di trattamenti antiossidanti e di bulloneria in acciaio inox garantisce una notevole durabilità del supporto; l'uso di accorgimenti antisvitamento delle viti applicate riduce di fatto a zero la manutenzione. Per considerazioni relative alla semplicità ed al minor costo, si è scelto di non rendere riparabile in linea il sensore; in caso di necessità, esso è facilmente sostituibile integralmente in un tempo inferiore a 10 minuti.

#### 5.2. Impostazione della campagna prove di Nozzano

Visti i costi non indifferenti dell'effettuazione delle campagne prova, si è pensato di realizzare una installazione nella quale fossero sotto controllo il maggior numero di parametri.

Il PL a Firenze citato al paragrafo precedente, sebbene favorito dalla grande numerosità e varietà di convogli in transito, oltreché al *range* di velocità ottimale per le misure in oggetto, aveva anche tre importanti carenze:

- per ragioni di esercizio (il PL è in pratica protetto dal segnale di blocco che fa anche da avviso alla protezione di SMN) molti treni transitano in accelerazione o in frenatura, cosa che rende difficile la comparazione di veicoli nominalmente uguali (si pensi ai convogli ETR) a velocità diverse;
- non era possibile, ovviamente, misurare più volte lo stesso treno in transito a velocità diverse per controllare l'effettiva influenza della velocità *sugli stessi difetti*;
- soprattutto, non era alcun modo possibile risalire,

dagli effetti provocati sul binario, all'entità delle sfaccettature che li avevano provocati.

Per questo motivo si è scelta una strategia diversa da quanto effettuato in precedenza. Individuata una tipologia di materiale rotabile atta ad effettuare con relativa facilità un servizio a spola con buone caratteristiche di accelerazione e frenatura, si è individuata una linea sulla quale fosse possibile effettuare, in un lasso di tempo ridotto, una serie particolarmente numerosa di corse prova con le seguenti modalità:

- velocità rigorosamente costante (fissata dalla precisione dei tachigrafi Hasler di bordo);
- possibilità di effettuare numerosi passaggi nelle due direzioni alla medesima velocità per stimare la ripetibilità dei risultati e l'effetto della direzione;
- possibilità di marciare a velocità estremamente ridotte (10 km/h) e più elevate (100 km/h) di quelle consentite dai siti scelti in precedenza, valutando così l'efficacia del WFD al di fuori del range di progetto (30÷80 km/h).

Il materiale scelto è costituito da 3 vetture MDVC, una semipilota a piano ribassato ed una E646. Le ruote interne delle tre vetture MDVC, peraltro assai soggette in esercizio al fenomeno sfaccettature, sono state molate, a cura dell'OMV di Firenze SMN. Un esempio di ruota molata e la dimensione delle sfaccettature così ottenute, insieme alla composizione risultante, sono indicate in fig. 5. Le vetture MDVC, inviate a Lucca ed inquadrare fra l'E646 e la semipilota prelevati da un Regionale al termine del servizio regolare, durante la notte fra il 18 ed il 19 novembre 1998 hanno effettuato un servizio a spola, in regime di interruzione, nell'ambito della stazione di Nozzano, sulla linea Lucca-Viareggio che normalmente, durante la notte, non è percorsa da traffico di alcun tipo.

Sono state effettuate, grazie alla reversibilità del convoglio ed alla presenza di due coppie di PdM, cinquanta corse nel giro di 4 ore, risultato particolarmente significativo nei confronti dei costi sostenuti e delle eventuali ripetizioni di campagne prova del genere. Mediante collegamento con ricetrasmittenti, si è riusciti ad effettuare fino



Fig. 5 - Il convoglio di prova con indicate le dimensioni longitudinali delle sfaccettature e le direzioni di marcia (in alto). Esempio di sfaccettatura da 30 mm realizzata per molatura (in basso).

ad un passaggio ogni quattro minuti alle velocità più alte!

La fig. 6 mostra lo schema di piazzamento dei sensori rilevanti alle misure in oggetto sul binario davanti al FV della stazione (altri sensori, utilizzati per altre finalità, non sono mostrati). In fig. 7 sono mostrate due viste del montaggio dei rilevatori di sfaccettature.

### 5.3. Analisi dei segnali raccolti a Nozzano

#### 5.3.1. Considerazioni generali

I segnali raccolti a Nozzano hanno la forma generale mostrata in fig. 8. Come è evidente, il segnale è composto da una componente quasi statica<sup>(1)</sup>, derivante dalla deformazione flessionale della rotaia, e da una componente dinamica, derivante dalle vibrazioni della rotaia dovute alle sfaccettature ed alla rugosità; quest'ultima componente diviene via via più importante al crescere della velocità fino quasi a mascherare il contributo delle sfaccettature, in totale accordo a quanto citato in [1].

Il segnale è stato scomposto, mediante filtratura numerica digitale a fase nulla<sup>(2)</sup> nelle due componenti al di sotto ed al di sopra dei 128 Hz.

#### 5.3.2. Estrazione delle sale dal segnale a bassa frequenza

La componente al di sotto dei 128 Hz evidenzia in modo particolare il segnale dovuto al carico assiale. Analisi preliminari hanno escluso l'utilizzo di tali segnali per la misura del carico assiale stesso (l'errore medio è di circa  $\pm 10\%$  del valore statico, quindi decisamente troppo elevato), confermando però la possibilità dell'uso come rilevatore del passaggio degli assi. Si precisa che, proprio in virtù della mancanza di possibilità di rilevazione al di sotto di certe velocità, non è pensabile utilizzare il WFD come pedale contaassi per segnalamento, ma esso potrebbe svolgere questa funzione come complemento del rilevatore stesso, permettendo di evitare l'uso di pedali contaassi per l'identificazione dei carrelli e della loro velocità istantanea.

Nel caso della campagna prove in oggetto, un semplice algoritmo basato su soglie ha consentito di individuare correttamente le 22 sale del convoglio a tutte le velocità di

<sup>(1)</sup> Ricordiamo che il cavo piezoelettrico, in quanto tale, non può fornire un segnale statico ma, in dipendenza delle caratteristiche elettriche dell'amplificatore di carica (costante di tempo), può fornire segnali dinamici al di sopra di una frequenza minima. Nel caso in oggetto tale frequenza è stata impostata a 0.2 Hz; l'uso del rilevatore di sfaccettature come misuratore indiretto del carico assiale è pertanto impossibile a velocità basse o nulle.

<sup>(2)</sup> Utilizzando il comando *filtfilt* del Signal Processing Toolbox di Matlab con un filtro *low-pass* e *high-pass* Butterworth di 8° grado complessivo.

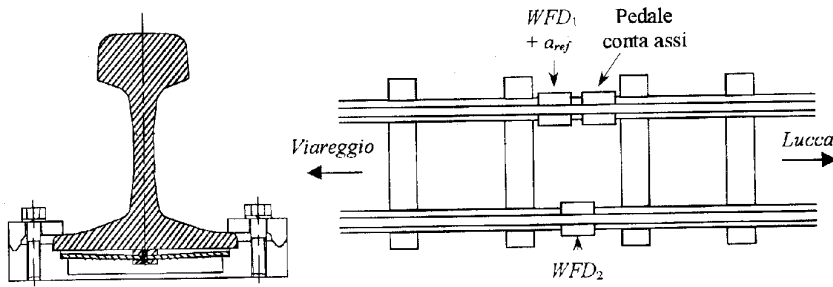


Fig. 6 - Schema di montaggio del rilevatore di ruote sfaccettate nella campagna di prove di Nozzano (sinistra). Schema della disposizione dei sensori sul binario. Dato che la geometria del convoglio è nota a priori, un solo pedale conta assi è sufficiente per calcolare la velocità istantanea per ogni carrello.

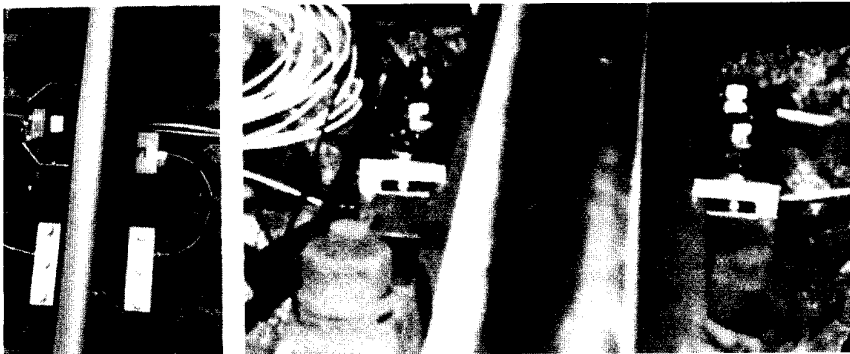


Fig. 7 - I rilevatori di sfaccettature installati presso la stazione di Nozzano sulla rotaia opposta al FV (a sinistra, con il pedale contaassi impiegato per la misurazione della velocità e della posizione) e lato FV (a destra).

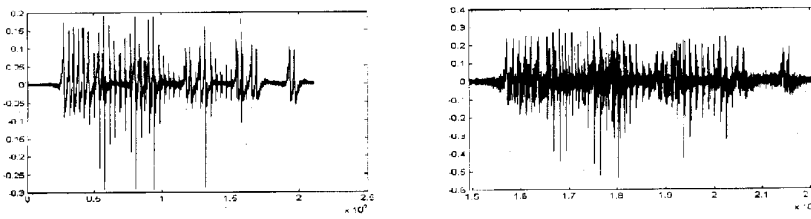


Fig. 8 - Segnali raccolti sul rilevatore a 30 km/h (sinistra) ed a 90 km/h (destra). Sono evidenti i segnali dovuti al passaggio delle sale dell'E646 (testa treno) e della semipilota (in coda); il segnale dovuto alle sale delle vetture centrali è sovrapposto al segnale derivante dalle sfaccettature.

prova, cioè da 10 a 100 km/h, per tutte le 50 corse prova svolte. Il risultato, che appare assai lusinghiero soprattutto viste le pessime condizioni delle ruote in transito, dovrà essere verificato nelle prime installazioni effettive, nelle quali pertanto il rilevatore sarà affiancato, come peraltro fatto finora, dai pedali contaassi.

In fig. 9 si riporta quale esempio il segnale trattato<sup>(3)</sup> per un transito a 50 km/h, con indicazione dei punti nei quali vengono individuati gli assi in transito.

5.3.3. Individuazione delle sfaccettature e loro classificazione

La componente al di sopra dei 128 Hz, pertanto depurata dal segnale quasi statico dovuto al carico assiale, si presenta sostanzialmente analoga ai segnali misurati con l'accelerometro  $a_{ref}$ . Durante l'applicazione dell'algoritmo

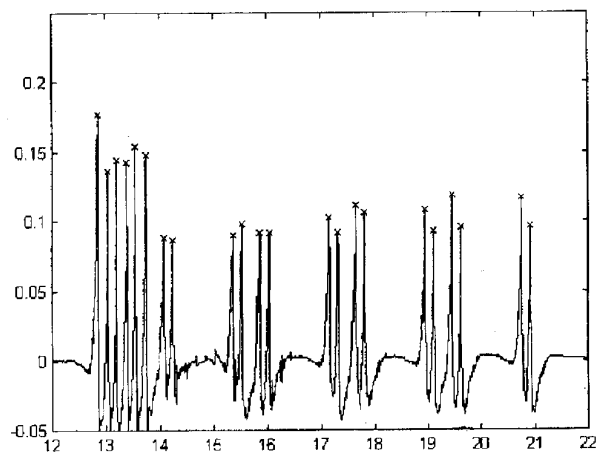


Fig. 9 - Segnale filtrato low-pass per un transito a 50 km/h. Sono indicati con una crocetta i punti nei quali vengono individuati gli assi in transito.

<sup>(3)</sup> Dopo il filtraggio a 128 Hz i segnali sono stati ridotti (decimazione con fattore venti) per velocizzare l'estrazione delle soglie.

## SCIENZA E TECNICA

basato sul *Cepstrum* descritto in precedenza, si è notato come esso, pur perfettamente in grado di identificare la presenza di ripetizioni dovute agli urti, non desse stime ripetibili riguardo alla loro ampiezza. Questa carenza, evidenziabile solo durante questa campagna prove data la conoscenza dell'ampiezza delle sfaccettature, è correlabile alla definizione della funzione *Cepstrum*. Essa, infatti, come tutte le funzioni ottenute mediante trasformata di FOURIER, ha un'ottima definizione nel dominio della frequenza<sup>(4)</sup> (nel nostro caso della *quefrecy*) ma, in assenza di processi di media, può avere errori anche notevoli sull'ampiezza. Non potendo evidentemente in questo caso fare ricorso all'uso di medie, l'errore non è eliminabile.

L'identificazione della presenza di più difetti localizzati su una singola ruota, possibile grazie al *Cepstrum*, è di gran lunga meno importante rispetto alla corretta identificazione della gravità di una sfaccettatura. Quando la ruota deve essere ritornata perché anormalmente usurata, il numero di difetti ha ben poca importanza. Si è pertanto sviluppata una nuova procedura numerica basata su criteri energetici che, benché decisamente meno fine, ben risponde alle necessità ultime del lavoro e ben complementa le notevoli possibilità di individuazione date dal *Cepstrum*.

La nuova procedura utilizza segmenti determinati del segnale raccolto dal rilevatore. Dalle informazioni ricavate dai pedali contaassi e da un database delle caratteristiche geometriche dei veicoli (lunghezza, interperno, passo carrelli) è infatti possibile isolare le porzioni di segnale relative a ciascun carrello, prendendo in considerazione la zona che, per le vetture in oggetto, va dai respingenti a circa metà vettura, per un'estesa complessiva di 13 m. Questa lunghezza consente di avere almeno 5 ripetizioni anche se, come vedremo, la sua estensione piuttosto ampia può portare ad una influenza dei carrelli adiacenti piuttosto elevata. La procedura completa prevede diversi passaggi, che portano alla definizione di un indice numerico che univocamente identifica la gravità del difetto. I passaggi principali sono, sinteticamente:

1. *estrazione dei segmenti di segnale d'interesse*. Il segnale completo del treno viene processato tenendo conto della posizione relativa dei pedali contaassi e del

<sup>(4)</sup> Queste funzioni, che consentono di stimare modulo e fase di un segnale, vengono dette 'a banda fine' o 'a banda stretta', dall'inglese *narrow-band*, e sono contrapposte alle tecniche di misura energetica effettuate normalmente in bande di ottava o frazioni, o 'a banda percentuale costante', dall'inglese *constant percentage band* (CPB).

<sup>(5)</sup> Benché non vi sia concettualmente alcuna difficoltà nell'includere anche tali segnali, le locomotive hanno spesso ruote di diametro superiore e interperno ridotto, il che rende difficile individuare una lunghezza sufficiente che non sia troppo influenzata dai carrelli adiacenti. Inoltre le locomotive, con qualche eccezione relativamente recente (E402B, E404 politensione, E412), sono normalmente frenate a ceppi ed hanno un peso frenato modesto, per cui raramente presentano *wheelflats*. Quando questi si presentassero, il PdM può identificarli rapidamente e segnalarli.

rilevatore; con il sopra citato database vengono scartati i segnali delle locomotive<sup>(5)</sup> e vengono identificati i tipi di vetture. Conseguentemente si ha un insieme di porzioni di segnale di numerosità pari al numero di carrelli delle vetture del convoglio;

2. *filtraggio ed inviluppo del segnale*. Il segmento viene opportunamente filtrato per eliminare la componente quasi statica dovuta al carico assiale, e viene calcolato il suo inviluppo con la trasformata di HILBERT<sup>(6)</sup>;

3. *valutazione energetica del difetto*. Viene valutata l'autocorrelazione del segmento (che riduce la componente casuale<sup>(7)</sup>) e viene calcolata la densità di potenza autospettrale (PSD) facendo ricorso al *Welch's averaged periodogram method*<sup>(8)</sup>;

4. *calcolo ampiezza difettosità*. Il massimo della PSD viene espresso in scala logaritmica, opportunamente scalato per il numero dei campioni, rapportato alla velocità del convoglio in quel segmento ed infine espresso in una scala univoca.

Al termine del procedimento si ha un solo numero corrispondente ad una qualificazione del difetto, per cui ogni carrello di un convoglio può essere identificato come 'non difettato', 'lievemente difettato' o 'gravemente difettato'. Nelle figure 10 ed 11 vengono mostrati esempi significativi della procedura di calcolo descritta.

Non è in questa sede possibile affrontare compiutamente l'analisi di dettaglio dei segnali raccolti; l'analisi statistica dei risultati ha dato risultati assai confortanti, indicando le false rilevazioni al di sotto dello 0.001 dei carrelli transitati. Questo valore, senz'altro lusinghiero, è stato ottenuto al passaggio di un convoglio con una numerosità ed una efficacia delle sfaccettature (appena fatte, quindi con i massimi effetti dinamici) non riscontrabili nell'esercizio normale, durante il quale si ritiene di poter migliorare ancora di almeno un ordine di grandezza la correttezza della rilevazione.

<sup>(6)</sup> La trasformata di Hilbert di un segnale reale nel dominio del tempo  $x(t)$  è un altro segnale reale nel dominio del tempo  $\underline{x}(t)$  tale che  $z(t)=x(t)+j\underline{x}(t)$  è un segnale analitico. Il lettore è rimandato a [13] per le (peraltro non semplici) definizioni e proprietà della trasformata di Hilbert.

<sup>(7)</sup> L'autocorrelazione di un segnale casuale è diversa da zero solo per uno *shift*  $\tau$  nullo. Un segnale casuale ha quindi un solo picco nell'origine. Dato che l'operatore autocorrelazione è lineare, se al segnale casuale è sovrapposto un segnale deterministico dato dalla sequenza degli urti questi ultimi verranno evidenziati (si avrà infatti un picco di autocorrelazione per ogni *shift* multiplo dell'intervallo di tempo fra due urti successivi) a scapito del segnale casuale che in pratica scomparirà dall'autocorrelazione eccezion fatta per la linea per  $\tau=0$ .

<sup>(8)</sup> Tale metodo consente di effettuare una stima suddividendo il segmento in segmenti più corti, togliendo la media, finestrando con una *Hanning window* e mediando i risultati con un *overlap* definito. Il lettore è rinvio alla documentazione del comando *spectrum* del *Signal Processing Toolbox* di *Matlab* ed al testo di base [14].



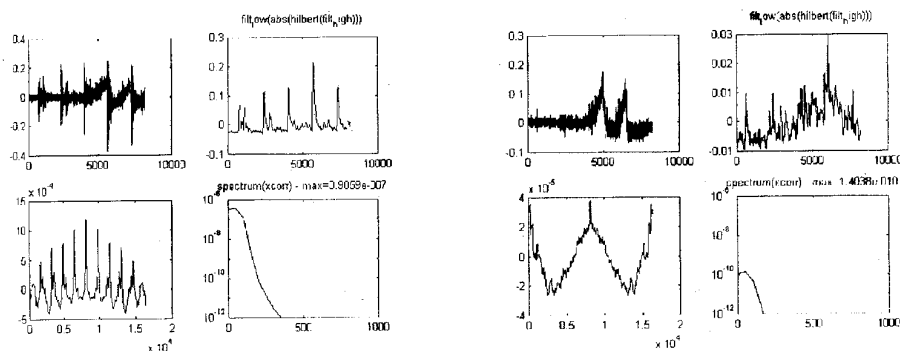


Fig. 10 - Analisi dei segnali per una corsa prova in direzione Lucca-Viareggio a 70 km/h. A sinistra: carrello 2 (secondo carrello prima vettura - sfaccettatura di 15 mm). A destra: carrello 8 (ultimo semipilota PR - assenza di sfaccettature). Si notino le diverse forme ed i diversi fondo scala dei vari diagrammi.

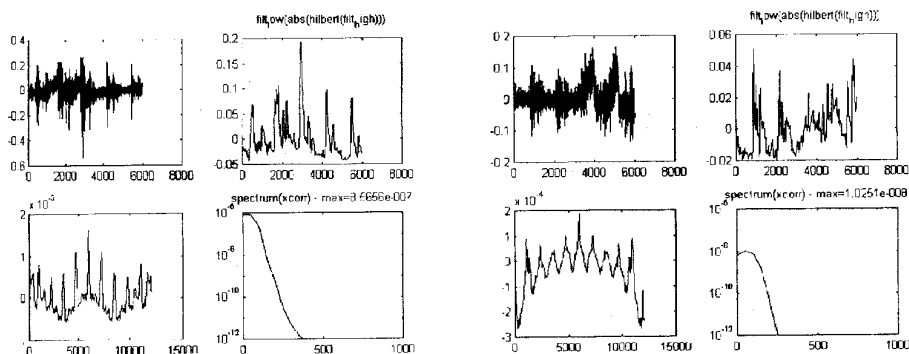


Fig. 11 - Analisi dei segnali per una corsa prova in direzione Lucca-Viareggio a 90 km/h. A sinistra: carrello 3 (primo carrello seconda vettura - sfaccettatura di 45 mm). A destra: carrello 4 (secondo carrello seconda vettura - assenza di sfaccettature). Come si può notare quest'ultimo diagramma è fortemente influenzato dalla presenza del carrello n° 3 (sfaccettatura di 45 mm).

## 6. L'integrazione del WFD nella rete ferroviaria esistente

Non è sufficiente progettare un buon sensore ed un valido algoritmo di processamento se il prodotto finale non è facilmente integrabile nel sistema ferroviario esistente. Ad esempio, alcuni dei vincoli che sono stati considerati durante la progettazione del supporto sono stati la possibilità di effettuare il montaggio in breve tempo, richiedendo operazioni preliminari semplici (una pulitura superficiale con spazzola abrasiva è sufficiente) e la possibilità di effettuare smontaggi e rimontaggi successivi con strumenti standard.

Il sistema di acquisizione, di condizionamento del segnale e di trasmissione dati è composto da una parte *hardware* e da una parte *software* qui sommariamente descritte.

### 6.1. Hardware

La componente *hardware* del WFD sul binario e nelle immediate vicinanze contiene i seguenti elementi:

- il cavo piezoelettrico ed il supporto già ampiamente descritti;
- un amplificatore di carica a basso consumo;
- un accoppiatore elettro-ottico a basso consumo per la trasmissione analogica in fibra ottica del segnale;

- un sistema di alimentazione fotovoltaico interamente allo stato solido<sup>(9)</sup>.

La componente *hardware* in stazione contiene i seguenti elementi:

- un accoppiatore elettro-ottico per la ricezione analogica in fibra ottica del segnale;
- un calcolatore industriale con scheda acquisizione dati analogica multicanale.

Di particolare rilievo appare la risultanza sperimentale che, durante tutte le prove in linea effettuate, non si sono mai riscontrate interferenze elettromagnetiche di alcun tipo sia per i convogli con locomotive con azionamento tradizionale che per quelli con azionamento elettronico a c.c. ed a c.a..

### 6.2. Software

Il software installato sul PC industriale è strutturato in due moduli:

<sup>(9)</sup> La trasmissione in fibra ottica e l'alimentazione fotovoltaica consentono l'assoluta indipendenza dal sistema di alimentazione esistente sulla linea e, dall'altro lato, garantiscono isolamenti assai superiori alle tensioni di linea (si pensi all'installazione del rilevatore su linee alimentate a 25 kV c.a.). Il sistema proposto consente isolamenti praticamente illimitati; con notevole facilità si raggiungono isolamenti da tensioni sul binario dell'ordine dei 75 kV. Ovviamente tutti i sistemi a livello binario sono rispondenti alle specifiche ambientali di tali applicazioni.

## SCIENZA E TECNICA

1. un modulo di acquisizione dati grezzi, per la creazione di una banca dati utile per la definizione delle soglie, operazione che richiede un minimo di autoapprendimento del sistema (alcune decine di convogli);

2. un modulo di acquisizione e trattamento dei segnali per il calcolo, in maniera completamente automatica, del valore delle difettosità.

Quest'ultimo modulo provvede alla memorizzazione dei dati richiesti ed alla trasmissione con i protocolli richiesti, definibili di volta in volta in base alle richieste del cliente finale.

### Conclusioni

Dall'esame della letteratura risultano evidenti i notevoli danni che le sfaccettature possono arrecare all'armamento, ai veicoli e all'ambiente, con conseguenze economiche e di degrado dell'affidabilità facilmente immaginabili.

Per soddisfare la richiesta diffusa di un rilevatore semplice, economico ed efficace, è stato sviluppato un sistema di misura completo, comprendente un trasduttore, un hardware di alimentazione e di trasmissione dati ed un algoritmo di analisi dei segnali decisamente innovativi. La notevole esperienza accumulata ed i risultati ottenuti consentono di affermare che il prodotto ha ormai lasciato la fase prototipale ed ha raggiunto il livello di precisione e di efficienza necessari per la sua immissione sul mercato della diagnostica ferroviaria. In particolare alcune soluzioni scelte, quale l'uso di componentistica di alto livello e facile reperibilità nonché l'uso di sistemi largamente indipendenti dalla singola rete ferroviaria, consentono di affermare che il sistema sviluppato può essere vantaggiosamente applicato in pratica come sistema *stand-alone* su qualunque linea ferroviaria, tanto in Italia quanto all'estero.

### Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare i sigg. SARTONI, SIGNORI, BARATTI e FRANCALANCI delle FS SpA, il cui aiuto è stato fondamentale per l'effettuazione della campagna prove in linea a Nozzano.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] A. BRACCIALI, G. CASCINI, *Le sfaccettature delle ruote ferroviarie. Parte 1 - Introduzione*, Ingegneria Ferroviaria, n. 7/2000.
- [2] AMP, *Piezo Film Sensors Technical Manual*, ed. 1993.
- [3] B.P. BOGERT, M.J.R. HEALY, J.W. TUKEY, *The Quefrency Analysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo-Autocovariance, Cross-Cepstrum and Saphe Cracking*, Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis, by M. ROSENBLATT, J. WILEY, New York, 1963, pp. 209-243.
- [4] M.P. NORTON, *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. Cambridge University Press, New York 1992.
- [5] G. CASCINI, *Un modello per la ricostruzione del segnale prodotto da sorgenti mobili ed applicazione alle vibrazioni di binari ferroviari*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Firenze, A.A. 1994-95.
- [6] A. BRACCIALI, G. CASCINI, *HF-MIRA: un algoritmo per la ricostruzione delle forze di contatto ruota-rotaia ad alta frequenza*, Ingegneria Ferroviaria 11, 1998, 790-800.
- [7] A. BRACCIALI, G. CASCINI, *Un modello per la rappresentazione della dinamica verticale di un binario ferroviario alle alte frequenze*, Ingegneria Ferroviaria 3, 1999, 132-142.
- [8] A. BRACCIALI, G. CASCINI, *Detection of Corrugation and Wheelflats of Railway Wheels using Energy and Cepstrum Analysis Of Rail Acceleration*, Journal of Rail and Rapid Transit 211, 1997, 109-116.
- [9] A. BRACCIALI, G. CASCINI, *Forze ed accelerazioni al contatto ruota-rotaia*, Ingegneria Ferroviaria 3, 2000, 77-89.
- [10] A. BRACCIALI, G. CASCINI, M. PIERALLI *A Wheelflat Detection Device Based on Cesptrum Analysis of Rail Acceleration Measurements*, Atti del World Congress on Railway Research, WCRR '97, vol. D, 513-521, Firenze, Italy, 1997.
- [11] KL. KNOTHE, S.L. GRASSIE, *Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies*, Vehicle System Dynamics 22, 1993, 209-262.
- [12] M. PIERALLI, A. BRACCIALI, G. CASCINI, *Detettore di ruota piatta e portale in linea per la verifica di sagoma*, Convegno CIFI, Napoli, 27-28.11.98, 242-248.
- [13] J.S. BENDAT, A.G. PIERSOL, *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley & Sons, New York, 1986, 484-516.
- [14] A.V. OPPENHEIM, R.W. SCHAFER, *Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, 1975.

(V. Sommari a pag. 535)