

Progettazione e sperimentazione preliminare del sistema di sospensioni attive/semi-attive del pantografo T2006

Parte II – Sperimentazione

Dott. Ingg. Luca PUGI^(*), Fabio BARTOLINI^(*),
Leonardo BALLI^(*), Carlo BANI^(**)

SOMMARIO – Nella prima parte di questo lavoro sono state descritte metodologie di progettazione e principali caratteristiche del prototipo di pantografo T2006.

In questa seconda parte vengono illustrate le metodologie utilizzate per la messa a punto e la sperimentazione del prototipo in laboratorio. Le prove eseguite hanno evidenziato prestazioni coerenti con le aspettative progettuali e in particolare hanno dimostrato la robustezza del sistema rispetto a condizioni di failure e alla variabilità delle condizioni d'esercizio.

9. Sperimentazione sul prototipo T2006

La realizzazione del prototipo è stata affidata a Fabbrica Macchinale S.r.l., azienda specializzata nella prototipazione e nella progettazione avanzata sita a Navacchio (Pisa). La costruzione iniziata a Novembre 2005 è terminata nel luglio 2006.

Il prototipo è stato attrezzato con un gran numero di sensori per un totale di sette accelerometri, cinque sensori di posizione, tre sensori di pressione e quattro celle di carico.

I sensori sono posizionati secondo lo schema visibile in fig. 12.

L'insieme dei sensori installati consente la misura della forza di contatto sugli archetti.

E' inoltre possibile acquisire in tempo reale tutte le informazioni utili relative alla cinematica del pantografo ed al funzionamento del sistema di controllo.

L'hardware prescelto per la prototipazione del controllo è costituito da un PC industriale che gestisce il calcolo

(*) Università di Firenze, Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco," Sez. di Meccanica Applicata alle Macchine.

(**) TRENTITALIA SpA, Direzione ingegneria sicurezza e qualità di sistema – Prove sperimentali e laboratorio.

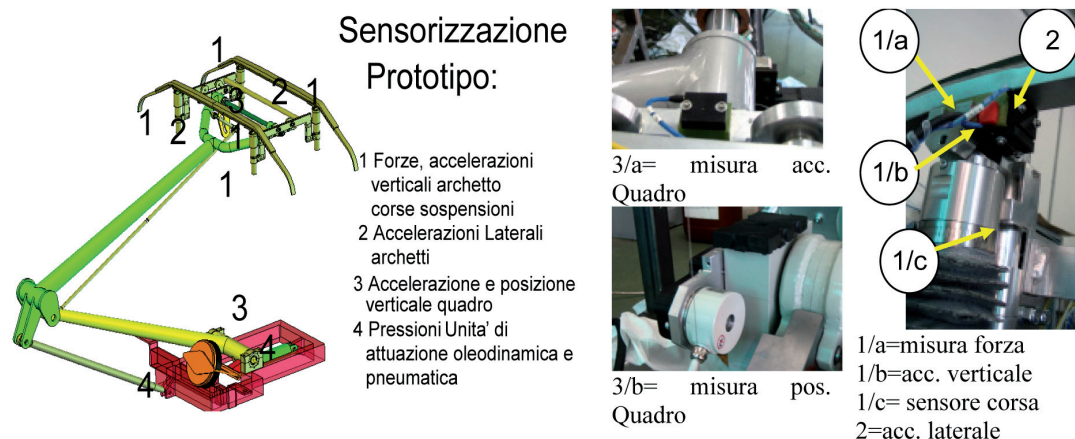


Fig. 12 - Disposizione dei sensori sul prototipo T2006 e relativi particolari.

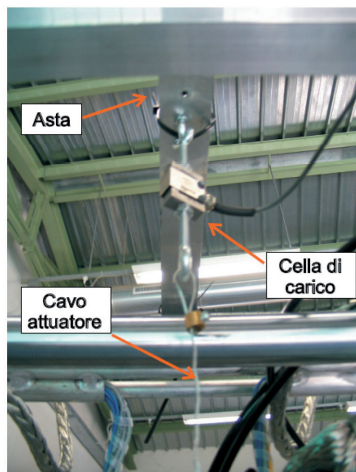
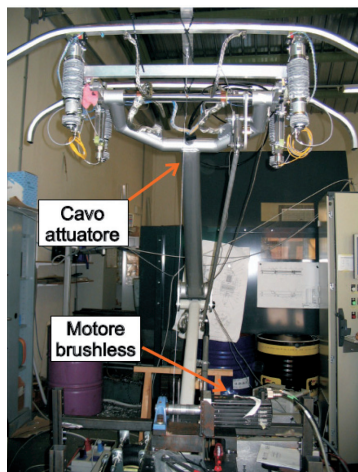


Fig. 13 - Attrezzatura sperimentale utilizzata durante le prime prove eseguite presso il realizzatore del prototipo (Scienza Machinale S.r.l. e Fabrica Machinale S.r.l.).

real-time e l'acquisizione dei dati. Il PC industriale è integrato con sensori e sistema di attuazione utilizzando un sistema di schede PLC D.Electron Z32 e relativi collegamenti in fibra ottica. Il codice real time viene generato direttamente a partire dal codice prototipo sviluppato in parte in matlab ed in parte in Visual C.

La frequenza di lavoro dei *task* relativi al controllo è 1 kHz.

Un apposito hardware *watchdog* vigila sulla effettiva esecuzione del controllo, mettendo automaticamente in emergenza il sistema in caso di anomalie, quali ad esempio *task overrun*.

9.1. Attrezzatura per calibrazione e collaudo

E' stata realizzata un'attrezzatura, visibile in fig. 13, per poter applicare sugli archetti forze e/o spostamenti imposti noti e verificarne la risposta.

L'attrezzatura in parte già utilizzata per precedenti attività sperimentali è composta da un PC equipaggiato con una scheda dSpace DS1102 che viene utilizzata per pilotare un motore brushless.

Sull'albero del motore è montato un tamburo su cui è avvolto un cavetto di acciaio.

Controllando la rotazione del motore, si possono imporre agli archetti profili di forza o di spostamento noti.

Il tiro prodotto dal cavo dell'attuatore viene distribuito tra i due archetti tramite un'asta, approssimativamente rigida, visibile in fig. 13.

Montando l'asta in posizioni diverse è possibile cambiare il punto d'applicazione delle forze applicate agli archetti.

Il cavo attuatore è strumentato con una cella di carico che consente di verificare in tempo reale la forza applicata sugli archetti.

In questo modo è possibile verificare la congruenza della forza esercitata dall'attuatore con quella misurata dalla catena di misura della forza di contatto montata sul pantografo.

Gli spostamenti imposti sono misurati in maniera ridondata utilizzando sia la misura della rotazione del motore sia un apposito sensore potenziometrico a filo.

L'attuatore a cavo semplifica l'attività sperimentale e rende possibile applicare eccitazioni note non solo agli archetti, ma anche a qualsiasi punto della struttura del pantografo.

Il sistema prevede l'acquisizione di canali supplementari collegati ad accelerometri e sensori di posizione potenziometrici. Tali sensori possono essere posizionati a piacere sia sulla struttura del pantografo sia sull'asta.

L'attrezzatura si presta al collaudo ed alla calibrazione di gran parte dei sistemi montati sul pantografo T2006.

9.2. Collaudo dell'attuatore oleodinamico

Le prime prove, eseguite nel Luglio 2006, si sono concentrate sul collaudo dei vari sotto-sistemi installati a bordo del pantografo.

L'attuatore oleodinamico visibile in fig. 14 ha subito lievi modifiche in fase di collaudo: supporti e giunti di collegamento sono stati rinforzati per ridurre i giochi e per irrigidire la struttura in modo da limitare le vibrazioni e rendere più preciso il funzionamento dell'attuatore.

Eseguite le modifiche si è proceduto a calibrare l'anello in retro-azione che regola la pressione dell'attuatore ed a verificarne le prestazioni in termini di precisione e banda passante.

La calibrazione degli algoritmi è stata condotta, valutando la risposta degli attuatori a gradini imposti sul riferimento di pressione.

La mobilità del quadro durante le prove è stata limitata in modo da realizzare prove isometriche a portata nulla ed evitare che l'applicazione di violenti gradini di forza da parte dell'attuatore si traducesse in altrettanto pericolosi movimenti del pantografo.

Le prove sono state ripetute in corrispondenza di altezze di sollevamento diverse in modo da verificare il funzionamento in tutto il range di lavoro del pantografo.

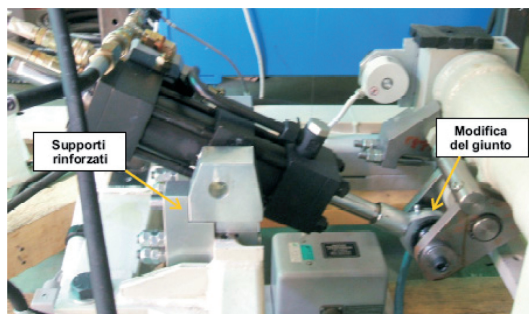


Fig. 14 - Attuatore oleodinamico e modifiche a supporti e giunti.

Dall'analisi dei risultati si è ottenuto che la banda passante del dispositivo poteva essere estesa senza particolari problemi di stabilità fino a frequenze nell'ordine dei 40 Hz. Si tratta di una banda passante più che soddisfacente, rispetto alle frequenze su cui maggiormente deve intervenire il sistema di controllo (0-4 Hz).

Ai test di risposta al gradino sono seguite ulteriori prove che avevano lo scopo di verificare la risposta dell'attuatore rispetto a spostamenti imposti del quadro.

Gli spostamenti sono imposti utilizzando l'attuatore descritto in fig. 13, applicando il cavetto direttamente al quadro e non agli archetti del pantografo.

Il test viene ripetuto per diverse frequenze con ampiezze di spostamento di circa ± 5 cm.

Durante la prova il sistema di controllo della pressione dell'attuatore è regolato in modo da mantenere costante

" Δp ", la differenza di pressione tra le due camere.

In fig. 15 si riportano alcuni risultati, da cui si possono ricavare una serie di considerazioni interessanti:

- se all'attuatore sono imposti spostamenti rilevanti il sistema di controllo non riesce a mantenere " Δp " costante. Di conseguenza la forza erogata dall'attuatore varia coerentemente con la pressione;
- l'andamento dell'errore di pressione è approssimativamente in fase con la velocità imposta all'attuatore. Di conseguenza l'azione del cilindro oleodinamico è equivalente a quella di un attuatore controllato in forza con uno smorzatore viscoso montato in parallelo secondo lo schema di fig. 16;
- questa caratteristica è desiderabile perché contribuisce a stabilizzare il sistema soprattutto ad alta frequenza dove l'azione dell'attuatore oleodinamico potrebbe eccitare i modi di vibrare del pantografo;
- questo effetto smorzante è tarabile in un ampio range intervenendo sui parametri di calibrazione del sistema di controllo. E' possibile ottimizzare lo smorzamento in ragione dell'applicazione.

9.3. Identificazione del prototipo T2006

Prima di procedere con la calibrazione del sistema di controllo si è ritenuto opportuno identificare la risposta dell'intero pantografo comprensivo di sistema di attuazione.

Questa operazione si è resa necessaria per valutare una serie di parametri difficili da prevedere in fase di progettazione quali, ad esempio, smorzamenti ed attriti. Altri

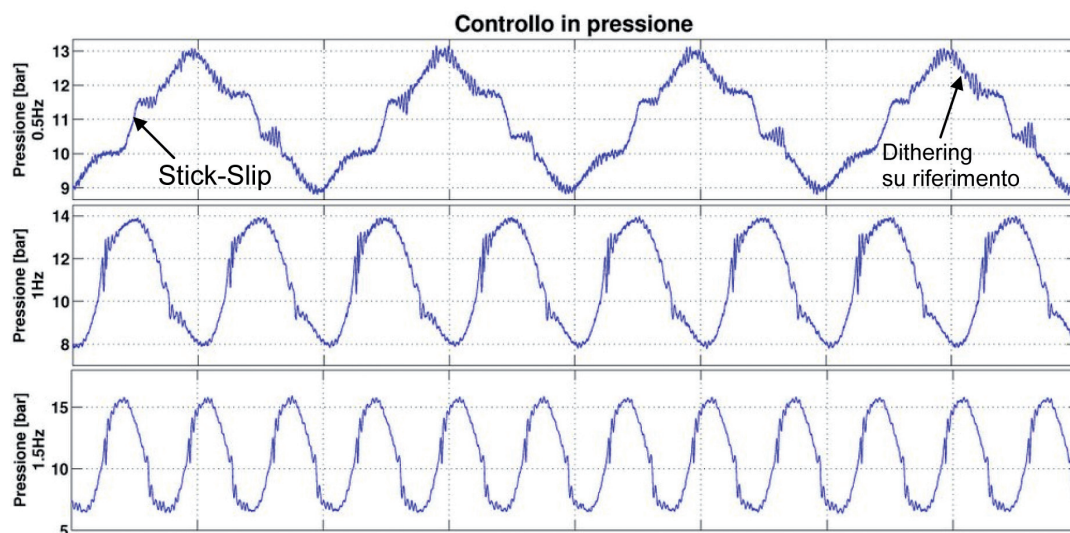


Fig. 15 - Andamento di " Δp " imponendo al quadro movimenti sinusoidali a frequenze diverse.

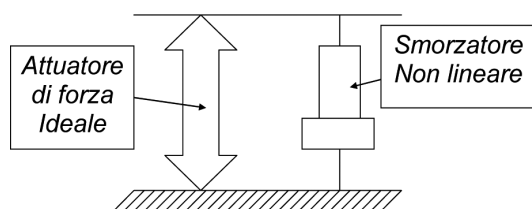


Fig. 16 - Modello semplificato della dinamica dell'attuatore.

parametri parzialmente noti in fase di progettazione hanno subito lievi variazioni nella fase di realizzazione in virtù di particolari esigenze tecnologiche: ad esempio modifiche di collegamenti saldati, interventi per il passaggio di cablaggi o il montaggio di sensori etc.

Il pantografo viene identificato imponendo agli archetti dei movimenti sinusoidali a bassa frequenza (0.5-1-1.5-2 Hz) di ampiezze variabili (1-3-5 cm). Gli spostamenti sono imposti utilizzando l'attrezzatura descritta in fig. 13.

Durante la prova, il cilindro idraulico è attivo e regolato con un riferimento di pressione " ΔP_{des} " costante. L'attuatore pneumatico viene alimentato con una pressione costante.

Le prove sono ripetute con valori di spinta statica diversa comprese tra 100 e 180 N.

Il sollevamento del pantografo durante la prova corrisponde ad un'altezza di posa della linea aerea di circa 5.20-5.30 metri.

La forza di contatto misurata sugli archetti viene confrontata con quella calcolata da un modello numerico che simula le medesime condizioni di prova.

Tutti i parametri del modello numerico vengono iterativamente cambiati fino a raggiungere un buon accordo con i risultati sperimentali.

Il modello è implementato in ambiente Matlab-Simulink™. Il "fitting" automatico dei dati viene effettuato imponendo la minimizzazione dello scarto quadratico medio.

Per ridurre problemi di "over-fitting" i singoli parametri di calibrazione possono variare solo entro intervalli finiti di valori fisicamente ammissibili [29, 30].

Il modello utilizzato per l'identificazione della risposta del pantografo è rappresentato in fig. 17:

- il modello è a costanti concentrate con due gradi di libertà;

- si tiene conto della cedevolezza del cavo attuatore tramite la rigidezza " K_o ";
- gli effetti indotti da attriti e isteresi presenti nel sistema sono simulati con due smorzatori non lineari " f_1 " ed " f_2 " applicati sui due stadi di sospensione.

Gli smorzamenti non lineari " f_1 " ed " f_2 " sono modellati secondo l'approccio di BOUC-WEN (21) [27, 28]:

$$\begin{cases} F_i(t) = z_i(t)u_i \\ \dot{z}_i = -\gamma_i |\dot{r}_i| |z_i|^{(n_i-1)} z_i - \beta_i \dot{r}_i |z_i|^{n_i} + A_i \dot{r}_i \end{cases} \quad (21)$$

$F_i(t)$ = forza erogata dallo smorzatore i-esimo;

z_i = stato ausiliario i-esimo;

r_i = corsa della sospensione i-esimo;

$u_i, A_i, \beta_i, \gamma_i, n_i$ = parametri di taratura dello smorzatore i-esimo

Agendo sui valori di tali parametri si possono approssimare diverse forme di non linearità quali ad esempio attriti coulombiani, isteresi ed altre forme di smorzamento strutturale.

In tabella 1 si riporta il set di parametri del modello numerico che meglio approssima i risultati sperimentali. Nelle figg. 18a e 18b si riportano alcuni risultati relativi al confronto tra risultati sperimentali e modello numerico ottenuto con la procedura di identificazione.

I risultati della simulazione mostrano un buon accordo con i dati sperimentali: la risposta simulata è molto fedele a quella reale riproducendo molti effetti non lineari effettivamente riscontrati sul pantografo.

Legenda	
m_2	Massa ridotta archetti
m_1	Massa ridotta quadro
k_2	Rig. Ridotta sospensione archetti
k_1	Rig. Ridotta quadro e attuazione
c_2	Smorz. Ridotto sosp. archetti
c_1	Smorz. Ridotto quadro e attuazione
P_i	Peso della massa ridotta i-esima
F_{ca}	Forza di contatto
F_s	Spinta statica (attuatore pneumatico+idraulico)
x_i	i-esima coordinata lagrangiana
$y_0(t)$	Spostamento imposto
f_i	Smorzamento non lineare (mod. Bouc-Wen)

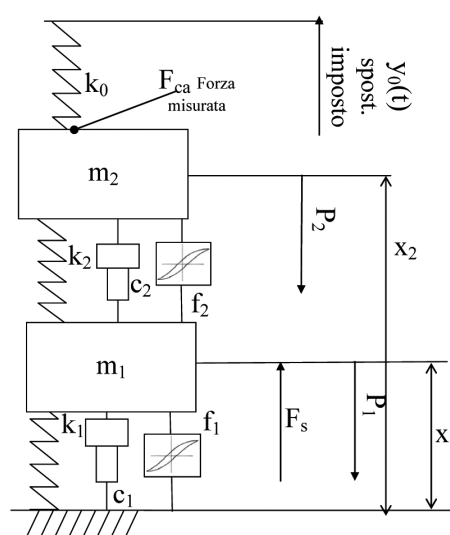


Fig. 17 - Modello non lineare utilizzato per l'identificazione del pantografo.

PARAMETRI DEL MODELLO RISULTANTI DALLA PROCEDURA DI IDENTIFICAZIONE

$M_1 \approx 37.4Kg$ (maggiore di quella reale)	$C_1 \approx 5Ns/m$	$A_1 \approx 4.49N/m$	$\gamma_1 \approx 0$	
$M_2 \approx 4.5Kg$ (minore di quella reale)	$C_2 \approx 60Ns/m$	$A_2 \approx 2.07N/m$	$\gamma_2 \approx 0.12$	
$K_1 \approx 187N/m$	$u_1 \approx 3220N/m$	$\beta_1 \approx 342.19$	$n_1 \approx 1$	$n_2 \approx 1$
$K_2 \approx 2158N/m$	$u_2 \approx 548N/m$	$\beta_2 \approx 391.01$	$K_0 \approx 22837N/m$	
Parametri relativi a f_1		Parametri relativi a f_2		

9.4. Implementazione del sistema di controllo

L'algoritmo di controllo proposto con la (12), è un regolatore PD (proporzionale derivativo) della corsa delle sospensioni del pantografo.

La testa del pantografo T2006 è stata progettata per garantire una elevata mobilità degli archetti che possono muoversi in maniera indipendente e descrivere moti di rollio e beccheggio come visibile in fig. 19.

La testa del pantografo presenta cinque gradi di libertà, mentre la strategia di controllo descritta dalla (12) ne prevede soltanto uno.

Per questo motivo il controllo (12) è implementato rispetto alla deformazione media " r_m " (22), definita come la media delle deformazioni " r_{2i} " delle sospensioni degli archetti.

L'equazione (23) esprime la legge di controllo che lega il comando in forza dell'attuatore " u_c " alla corsa delle sospensioni degli archetti:

$$r_m = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 r_{2i} \quad (22)$$

$$u_c = K_p (r_m - r_o) + K_d \dot{r}_m + offset \quad (23)$$

K_p = guadagno proporzionale; K_d = guadagno derivativo;

r_o = corsa desiderata (valor medio desiderato);

$offset$ = offset su forza attuatore

I parametri del regolatore (23) sono stati ottimizzati sperimentalmente.

Agli archetti del pantografo sono imposti spostamenti sinusoidali utilizzando l'attrezzatura descritta in figura 13. I valori di frequenza ed ampiezza degli spostamenti sono riportati in tabella 2.

La deviazione standard (24) della forza di contatto viene misurata durante le prove sperimentali.

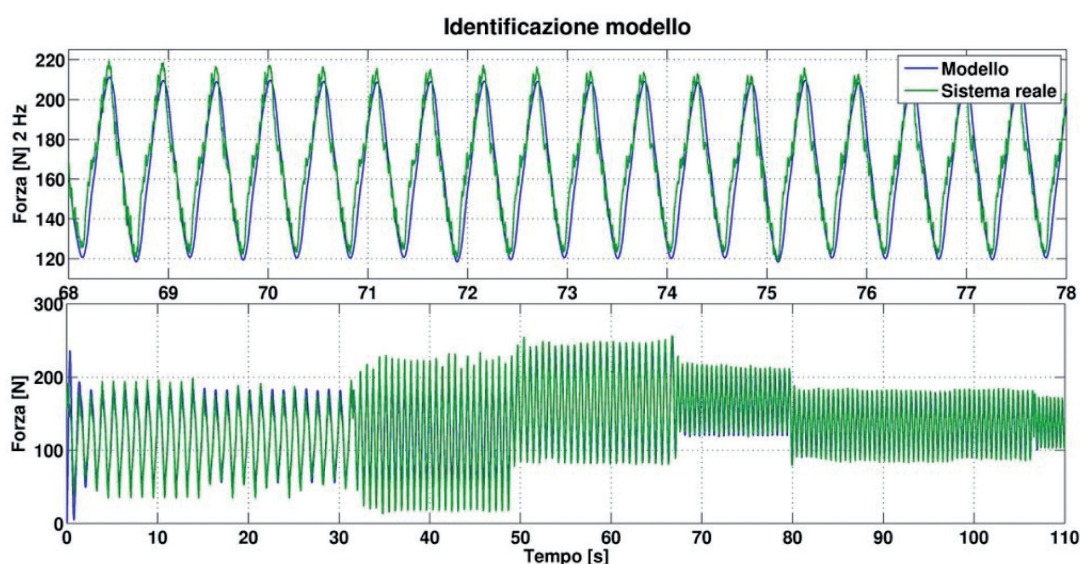


Fig. 18a - Forza di contatto durante test con spostamenti imposti, confronto tra misure sperimentali e valori calcolati dal modello prodotto dalla procedura di identificazione (risultati globali e dettaglio della risposta a 2 Hz).

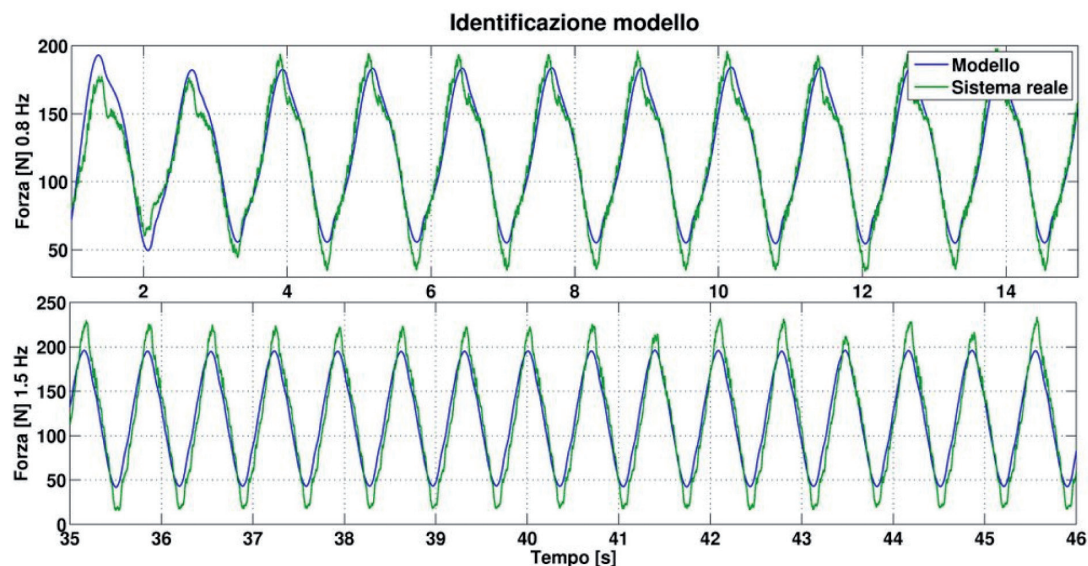


Fig. 18b - Forza di contatto durante test con spostamenti imposti, confronto tra misure sperimentali e valori calcolati dal modello prodotto dalla procedura di identificazione (dettaglio della risposta a 0.8 ed a 1.5 Hz).

TABELLA 2
FREQUENZA ED AMPIEZZA DEGLI SPOSTAMENTI
SINUSOIDALI IMPOSTI

frequenza	ampiezza
0.5Hz	$\pm 0.05\text{m}$
1Hz	$\pm 0.05\text{m}$
1.5Hz	$\pm 0.02\text{m}$

Per ottimizzare il regolatore viene definito un indice di performance " S_{tot} " (25) basato sulla media pesata della deviazione standard misurata alle diverse frequenze:

$$S_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_{ca}(i) - F_m)^2 \quad (24)$$

dove $F_{ca}(i)$ = forza di contatto all'istante i -esimo

F_m = media delle forze $F_{ca}(i)$ misurate definita come $F_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{ca}(i)$

n = numero dei campioni misurati in una prova

S_f = scarto quadratico durante prova effettuata alla frequenza " f " Hz

ad esempio $S_{0.5}$ = prova con spostamento sinusoidale imposto alla frequenza di 0.5Hz

$$S_{tot} = (0.5)^2 S_{0.5} + S_1 + (1.5)^2 S_{1.5} \quad (25)$$

Le prove sono ripetute iterativamente variando i diversi parametri del regolatore. Viene ritenuta "ottima" la configurazione che minimizza il valore dell'indice di performance " S_{tot} ".

In fig. 20 si riporta un grafico che riproduce l'andamento di " S_{tot} " al variare del valore dei guadagni propor-

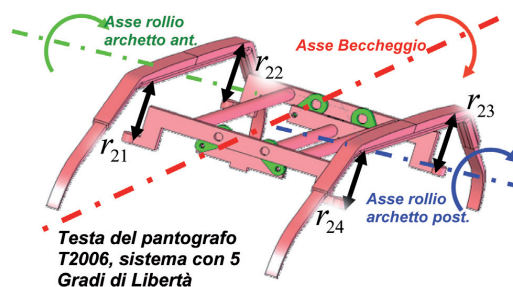


Fig. 19 - Gradi di libertà della testa del pantografo T2006 e definizione di " X_c " (22).

zionale e derivativo del regolatore. E' interessante notare che la soluzione ritenuta "ottima" corrisponde ad un regolatore puramente derivativo (" K_p "=0).

10. Risultati della sperimentazione

I risultati presentati si riferiscono alle attività sperimentali svolte presso il costruttore a Navacchio (Pisa) nell'autunno del 2006.

Si tratta di risultati ottenuti solo ed esclusivamente con prove di laboratorio; tuttavia gli autori li ritengono estremamente significativi delle potenzialità del sistema di sospensioni attive proposto in questo lavoro.

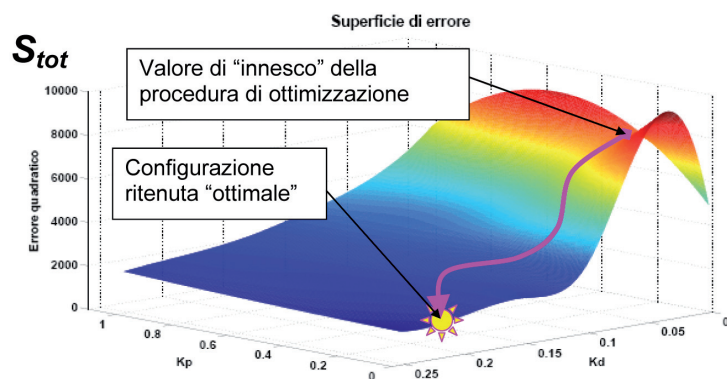


Fig. 20 - Andamento di " S_{tot} " in funzione dei guadagni " K_p " e " K_d " del sistema di controllo (superficie interpolata a partire da risultati sperimentali).

10.1. Risposta a spostamenti sinusoidali imposti

In questi test il pantografo viene sottoposto a spostamenti sinusoidali imposti. L'attrezzatura utilizzata è sempre quella di fig. 13. Ampiezze e frequenze degli spostamenti imposti sono quelle descritte in tabella 2.

Le prestazioni del sistema di controllo sono valutate comparando l'andamento della forza di contatto a parità di spostamento imposto: minori oscillazioni della forza di contatto corrispondono ad una migliore capacità del pantografo di adattarsi alle fluttuazioni imposte dalla linea.

In fig. 21 si confronta l'andamento della forza di con-

tatto quando il sistema di controllo è attivo con quella ottenuta quando il pantografo funziona in modalità passiva.

A parità di spostamento imposto la riduzione dell'oscillazione della forza di contatto è evidente.

In fig. 22 gli stessi risultati sono confrontati in termini di contenuto spettrale: nel range di frequenze fino a 3-4Hz la sospensione attenua efficacemente le oscillazioni della forza di contatto; anche a frequenze superiori le oscillazioni risultano comunque attenuate senza che si innescino vibrazioni e/o cicli limite a frequenze ben definite.

Questo risultato è importante perché implica un funzionamento "dolce" e "stabile" del sistema di controllo. I risultati evidenziano la possibilità di ridurre la forza quasi statica applicata al pantografo, senza il rischio di aumentare l'occorrenza dei distacchi, con evidenti vantaggi sulla dinamica dell'intero sistema.

Le prove sono quindi ripetute con spostamenti imposti con ampiezze e frequenze diverse.

In ragione dei risultati ottenuti si è ritenuto opportuna l'introduzione di un più accurato filtraggio digitale dei segnali acquisiti. In particolare è stata migliorata la calibrazione dei filtri applicati ai segnali utilizzati dal sistema di controllo.

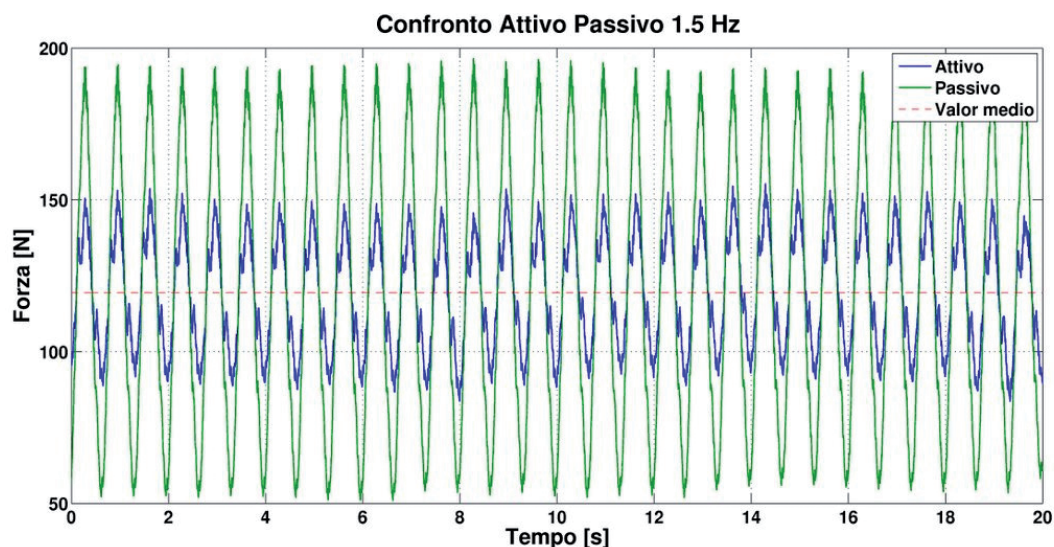


Fig. 21 - Andamento della forza scambiata tra attuatore ed archetti in test di spostamento sinusoidale imposto con frequenza di 1.5Hz e ampiezza di $\pm 2\text{cm}$ (" $K_p = 0$ " e " $K_d = 0.25$ ").

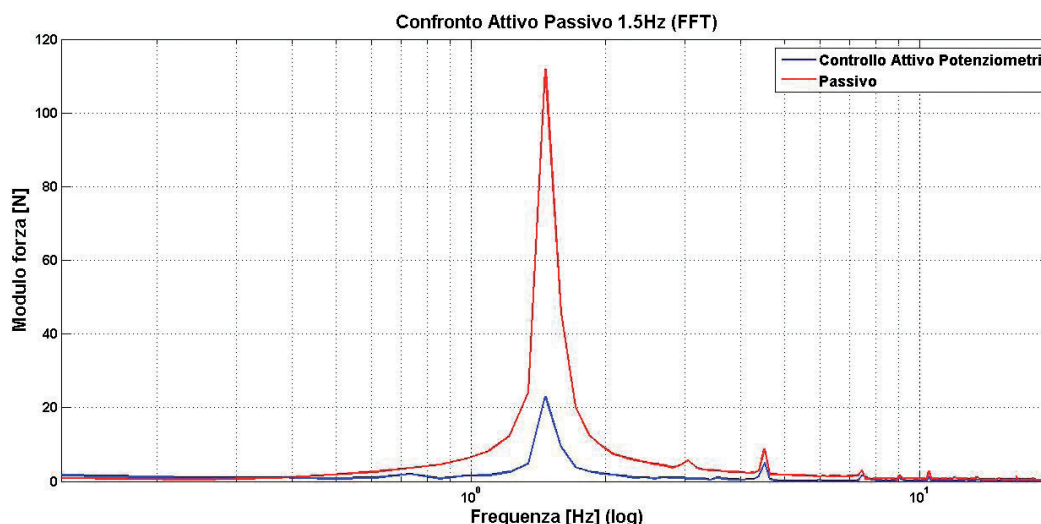


Fig. 22 - Confronto tra gli spettri delle forze (forza scambiata tra archetti e attuatore) misurate durante test di spostamento imposto ad 1.5 Hz.

Le prove sono ripetute con spostamenti sinusoidali a diverse frequenze.

Nelle figg. 23a e 23b si riportano dei grafici riassuntivi in cui è valutato l'andamento della forza di contatto in quattro modalità di funzionamento:

- *Controllo ON*: il sistema di controllo è funzionante;
- *Controllo Improved ON*: il sistema di controllo è funzionante con filtraggio digitale dei segnali acquisiti;
- *Controllo Press ON*: il sistema di controllo è disattivato, il cilindro oleodinamico è controllato in modo da fornire una spinta statica costante.
- *Attuatore emergenza*:: il sistema di controllo è completamente disattivato. Il cilindro idraulico non è alimentato e oppone una limitata resistenza al moto perché la valvola di ricircolo/bypass, visibile in fig. 8e, è aperta. L'area di passaggio in corrispondenza della valvola di ricircolo è tarata in modo da garantire uno smorzamento equivalente di circa 60-70 Ns/m. Questa configurazione di funzionamento completamente passiva è assicurata in condizioni di emergenza o avaria del sistema.

In fig. 23c sono confrontati gli andamenti della massa ridotta del pantografo nelle diverse configurazioni.

Dall'analisi dei risultati delle figg. 23a, 23b, 23c si può dedurre che l'azione sistema di controllo migliora sensibilmente la risposta del sistema.

Inoltre esistono ulteriori margini di miglioramento delle prestazioni: la configurazione "Controllo Improved ON" presenta prestazioni nettamente superiori a fronte di interventi relativamente semplici sul filtraggio digitale dei

dati acquisiti.

La "massa apparente" quando il sistema di controllo è attivo si mantiene al di sotto dei 15-20 kg nel range di frequenze 1-20 Hz. Per quanto riguarda la frequenza di 0.5 Hz il valore della massa apparente è elevato. Si ritiene che questo problema possa essere risolto in futuro con pochi interventi sulla meccanica del prototipo.

10.2. Sicurezza intrinseca del sistema (comportamento fail safe)

Le specifiche di progetto richiedono un comportamento "fail safe", cioè la realizzazione di un sistema di controllo intrinsecamente sicuro: in caso di avaria le prestazioni del sistema possono degradarsi, ma senza compromettere la sicurezza.

Per quanto riguarda il software, l'algoritmo di controllo ha una struttura semplice che richiede limitate risorse di calcolo e può essere implementato anche su un hardware dedicato con costi limitati. Attualmente un sistema watch-dog vigila su esecuzione dei "task" del controllo. In caso si verificano errori/ritardi di esecuzione, il sistema di controllo viene spento ed il pantografo in emergenza viene abbassato.

Ulteriori diagnostiche vigilano sulla lettura dei sensori acquisiti e sulla pressione erogata dalla centralina oleodinamica: se un sensore presenta uscite elettriche incompatibili con il corretto funzionamento, la procedura di emergenza viene attivata.

In ogni caso quando la procedura di emergenza viene

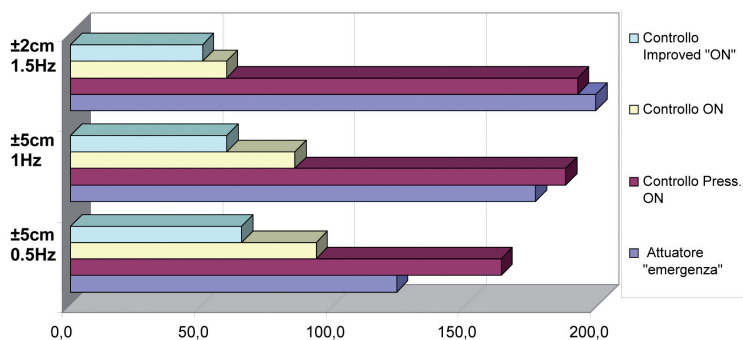


Fig. 23a - Variazione picco-picco della forza di contatto in funzione del tipo di eccitazione imposta e della configurazione di funzionamento del sistema.

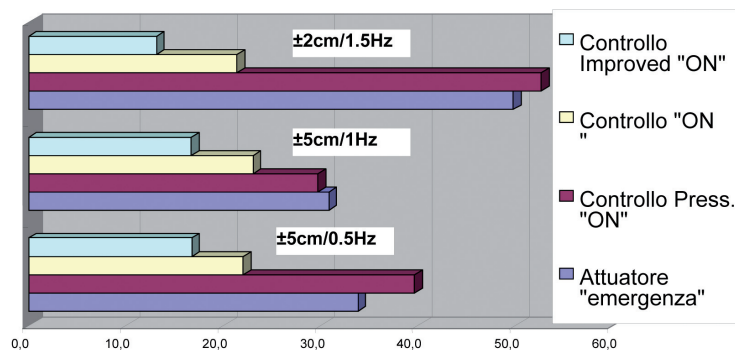


Fig. 23b - Deviazione Standard della forza di contatto in funzione del tipo di eccitazione imposta e della configurazione di funzionamento del sistema.

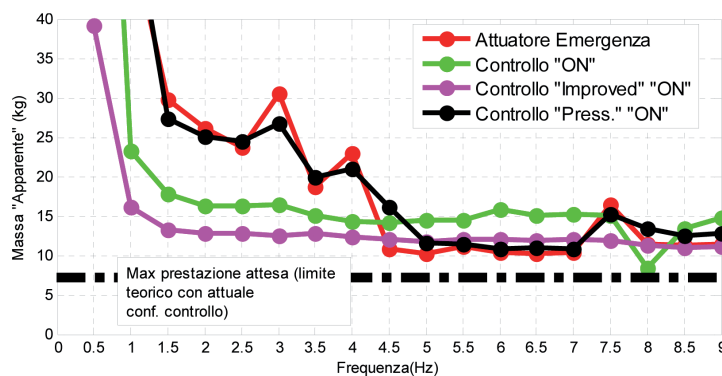


Fig. 23c - Andamento della "massa apparente" calcolata secondo [32].

attivata si interrompe l'alimentazione al cilindro oleodinamico e si apre la valvola di ricircolo di fig. 8e.

Sono state comunque eseguite ulteriori prove sperimentali per verificare il comportamento del sistema in ca-

presenza di carichi "imprevisti" o di transitori molto violenti. Nelle figg. 25a e 25b sono riportate alcune foto relative alle attività svolte prima a Navacchio e poi successivamente presso il Politecnico di Milano e i laborato-

so di avarie parziali o comunque non riconosciute dalla diagnostica del sistema.

In queste prove i sensori utilizzati per misurare la corsa delle sospensioni vengono deliberatamente "spenti" aggirando la diagnostica del sistema. La rottura del sensore viene simulata sostituendo la lettura della misura effettuata con un valore costante casuale. Nessun filtro è applicato per rendere la transizione più dolce.

La rottura dei sensori è simulata durante test con spostamenti sinusoidali imposti per verificare la risposta del sistema.

In fig. 24 si riporta l'andamento della forza di contatto di una prova in cui vengono disattivati uno dopo l'altro tutti i sensori che misurano la corsa delle sospensioni.

I risultati sono incoraggianti:

- nonostante le avarie progressive, il valor medio della forza di contatto si mantiene costante.
- quando un sensore simula la rottura di un sensore, il sistema di controllo manifesta una elevata stabilità anche durante il transitorio;
- la degradazione delle prestazioni al crescere del livello di avaria è graduale e non si evidenziano in alcun modo comportamenti "pericolosi";
- se tutti i sensori che misurano la posizione delle sospensioni vanno in avaria il cilindro oleodinamico risulta comunque controllato in pressione. In queste condizioni il cilindro si limita a fornire una spinta statica costante ed a smorzare i moti del quadro ad alta frequenza.

Ulteriori test empirici sono stati effettuati applicando agli archetipi sollecitazioni di ampiezza e contenuto spettrale molto vario. Questi test avevano lo scopo di verificare la stabilità del sistema anche

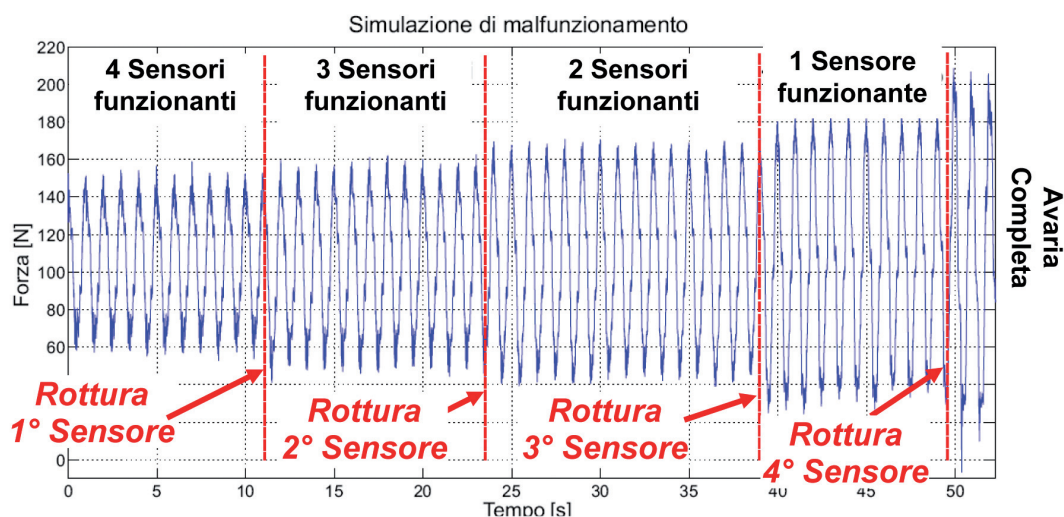


Fig. 24 - Andamento della forza di contatto con avarie progressive dei sensori che misurano la corsa delle sospensioni (spostamento imposto $\pm 0.05\text{m}$ a 1Hz).

ri di TRENITALIA, i cui risultati saranno oggetto di future pubblicazioni.

Anche con sollecitazioni e disturbi assai vari e poco prevedibili, il sistema ha sempre mostrato un comportamento stabile, esente da vibrazioni e/o altre forme di risposta indesiderabile.

11. Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro è stata presentata una soluzione “innovativa” per rendere attivo/semi-attivo il sistema sospen-

sivo di un pantografo ferroviario.

I risultati prodotti dalla sperimentazione in laboratorio inducono alle seguenti conclusioni:

- la soluzione proposta è effettivamente implementabile con componenti industriali e costi limitati;
- le prestazioni del sistema sono buone specialmente per quanto riguarda le fluttuazioni della forza di contatto fino a $3\text{-}4\text{Hz}$;
- la logica di controllo è semplice, facile da calibrare e da implementare;

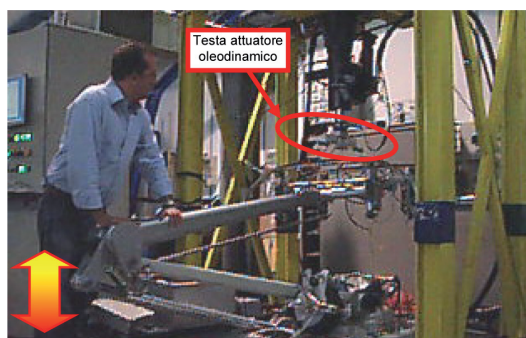


Fig. 25a - Movimenti del quadro disturbati manualmente in modo da provocare urti/distacchi tra archetti e testa del banco prova oleodinamico (prove presso i laboratori del Politecnico di Milano nell'inverno 2006-2007).



Fig. 25b - Disturbi in forza introdotti manualmente in parallelo all'azione dell'attuatore a cavo, (prove presso il fornitore autunno 2006).

- il sistema ha un comportamento intrinsecamente sicuro anche in condizioni di avaria.

Prima di procedere a prove in linea è necessaria la sperimentazione dell'apparato sotto tensione per verificare con sicurezza l'isolamento elettrico.

Sono in corso di studio miglioramenti del sistema di controllo con particolare attenzione alla possibilità di sostituire i sensori che misurano la corsa delle sospensioni con degli accelerometri.

Si ritiene esistano ancora ampi argini di miglioramento sia in termini di prestazioni sia di costo e affidabilità del sistema.

La strategia di controllo proposta potrebbe essere applicata come retrofit anche a pantografi AV commerciali in modo da migliorarne il comportamento in esercizio.

In questo modo si potrebbe realizzare un graduale trasferimento di questa tecnologia dal prototipo dimostrativo T2006 ad un prodotto commerciale collocabile sul mercato a costi ragionevoli.

Ringraziamenti

La progettazione e la sperimentazione del sistema proposto hanno richiesto l'integrazione di un gran numero di sotto-sistemi diversi, e l'acquisizione di un vasto Know-How interdisciplinare

Gli autori ritengono doveroso ringraziare tutte le strut-

ture e le persone che hanno contribuito alla realizzazione di questo progetto.

BIBLIOGRAFIA

- [26] O. ERNEST, "Measurement System, Application and Design", Doebelin Mc Graw Hill ISBN 0-07-100697-4.
- [27] R. BOUC, "Forced Vibration of Mechanical Systems with Hysteresis", Proc. of the Fourth Conf. on Non-linear Oscillation, Prague, Czechoslovakia 1967.
- [28] Y.K. WEN, "Method for Random Vibration of Hysteretic Systems", J. Engr. Mech. 102:249-263, 1976.
- [29] T.F. COLEMAN, Y. LI, "An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds", SIAM Journal on Optimization, Vol. 6, pp. 418-445, 1996.
- [30] T.F. COLEMAN, Y. LI, "On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds" Mathematical Programming, Vol. 67, n. 2, pp. 189-224, 1994.
- [31] B. ALLOTTA, A. PISANO, L. PUGI, E. USAI, "VSC of a servo-actuated ATR90-type pantograph", Proc. of 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference, pp. 590-595, Sevilla, Spain, 12-15 December 2005.
- [32] Rete Ferroviaria Italiana S.p.A. "Specifica Tecnica delle prove da eseguire per caratterizzare un pantografo" Codifica RFI/DC/TC.TE/ST TE 74-C.

Sommaire

PROJET ET EXPÉRIMENTATION PRÉLIMINAIRE DU SYSTÈME D'AMORTISSEMENT ACTIFS / SEMI ACTIFS DU PANTOGRAPHE T2006 - Deuxième partie - Expérimentation

Dans la première partie de ce travail on a décrit les méthodologies de projet et les principales caractéristiques du prototype de pantographe T2006.

Dans cette deuxième partie on décrit les méthodologies utilisées pour la mise à point et l'expérimentation du prototype en laboratoire. Les essais réalisés ont mis en évidence des performances cohérentes avec les attentes de projet et en particulier ont démontré la solidité du système par rapport aux conditions de rupture et à la variabilité des conditions d'utilisation.

Summary

DESIGN AND PRELIMINARY TEST OF THE ACTIVE/SEMI-ACTIVE SPRING SYSTEM OF THE T2006 PANTOGRAPH - Part II - Test

The first part of this work has concerned design methodologies and main characteristics of the T2006 pantograph prototype.

The present part illustrates the methodologies regarding the system set-up and the prototype lab-test. Tests have showed performances that are coherent with design expectations and in particular have confirmed the system robustness with respect to failure conditions and to variability of operation conditions.

Inhaltsübersicht

PROJEKT UND VORLAUFIGES EXPERIMENT VON AKTIVEN- UND HALBAKTIVEN FEDERUNGSSYSTEM DES STROMABNEHMER T2006. Teil 2. Experiment.

In diesem zweiten Teil werden die Verfahren der Zurechtweisung und Erprobung des Laborprototyps.

Die gewonnenen Resultaten sind im Einklang mit den Projekterwartungen und haben die Tauglichkeit des Systems beweist, auch im Fall von Havarien und unter verschiedenen Betriebszuständen.