Una tecnica per modellare sistemi complessi

Giovanni Celentano, Raffaele Iervolino, Stefano Porreca

La scrittura di un modello di un sistema complesso, composto da più sottosistemi interagenti, è un compito molto oneroso da un punto di vista pratico, in quanto richiede competenze in campi a volte molto diversi tra loro. Viene illustrata una metodologia di carattere generale che consente di sviluppare i modelli di singoli sottosistemi senza conoscere i sistemi con cui interagiscono, in forma tale da ottenere agevolmente il modello del sistema complessivo. L'efficacia del metodo proposto viene dimostrata con applicazioni ingegneristiche reali.

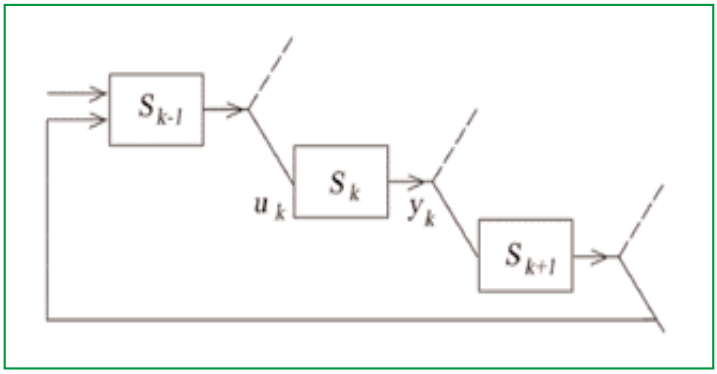

Figura 1 - Sistemi interconnessi interagenti

Prof. G. Celentano, ing. R. Iervolino, Dipartimento di Informatica e Sistemistica, Università degli Studi di Napoli, Federico II, {giocelen, rafierv}@unina.it; ing. S. Porreca, Elasis-Sperimentazione Veicoli e Componenti, Area Affidabilità e Qualità, Pomigliano d'Arco (NA), stefano.porreca@elasis.fiat.it.

Al tempo d'oggi sempre più i sistemi complessi vengono realizzati assemblando componenti multiuso. Per la numerosità dei componenti da assemblare, la loro vasta gamma, la loro complessità intrinseca e l'esistenza di interazione tra essi, non sempre risulta semplice stabilire il legame tra comportamento dinamico dell'intero sistema ed i dati caratteristici dei suoi componenti, sia ai fini della scelta ottima dei componenti tra quelli già disponibili e/o in produzione, sia ai fini della valutazione dell'opportunità di progettare e realizzare alcuni componenti *ad hoc* [1, 2, 3, 4]. Più in dettaglio, dei vari componenti, alcuni si ritengono tecnologicamente quasi assestati e a parametri fissi, altri invece sono ancora oggetto di ricerca (come concezione, materiali usati, ed algoritmi di controllo) e/o a parametri variabili. Per i primi esistono conoscenze e dati sufficienti per determinarne un modello matematico, vuoi perché in uso da lungo tempo, vuoi perché si possono effettuare su di essi prove a basso costo; per i secondi invece esistono pochissimi dati e/o codici di calcolo molto complessi e in ambienti di programmazione molto diversi.
Ciò, oltre agli effetti di "carico" dovuti alle interazioni, non sempre portati in conto dai singoli specialisti, rende ancora più difficile, se non impossibile, la modellizzazione del sistema complessivo. Risulta pertanto di grande ausilio una metodologia che consente di ottenere un modello che sia in grado di valutare le caratteristiche dinamiche dell'intero sistema sulla base di sottomodelli "interagenti" di tipo funzionale per i primi componenti, di tipo funzionale-fisico, di ordine ridotto rispetto ai complessi modelli interamente fisici, per i secondi. La metodologia proposta in questo articolo è stata utilizzata per ottenere in forma parametrica vari simulatori dinamici, tra cui il sistema di avviamento e l'impianto frenante di un'autovettura del gruppo Fiat [2, 3].

Modellistica dei sistemi interagenti

È ben noto che collegando due o più sistemi tra loro si ottiene un sistema complessivo che, in generale, ha proprietà molto diverse rispetto a quelle di ognuno dei sistemi componenti [4]. Inoltre, spesso per semplicità "accademica", si assume che il modello di un dato sistema S_k resta invariato se collegato con altri sistemi "a monte" e "a valle" (Figura 1).
In realtà, il suo comportamento dinamico è necessariamente modificato, dal momento che risente degli effetti di "carico" dei sistemi con cui interagisce. Per tener conto degli effetti di "carico", si consideri il caso, molto frequente nella pratica, di sistemi composti da

N sottosistemi, schematizzabili come doppi bipoli (DB_k, k=1,…, N), che possono essere di tipo elettrico, meccanico, idraulico, pneumatico, termico ecc. Si supponga che le grandezze di interesse del generico doppio bipolo siano *variabili di forzamento* v_{1k}, v_{2k} e quelle di interazione *variabili di flusso* i_{1k}, i_{2k} (Figura 2a). Se il modello di ciascun doppio bipolo MDB_k viene scritto considerando l'ingresso aggiuntivo i_{2k} e l'uscita aggiuntiva i_{1k} (Figura 2b), allora il modello del sistema complessivo si può ottenere "assemblando" i modelli delle varie parti come mostrato in Figura 3.
Per semplificare il generico sottomodello MDB_k si osservi che il sottosistema DB_k corrispondente può essere:
- tecnologicamente assestato e a parametri fissi;
- di nuova concezione e/o a parametri variabili.

Nel primo caso si può ricorrere a modelli *funzionali* (lineari, non lineari, continui, discreti) tarabili sulla base di dati già disponibili o ottenibili mediante semplici prove sperimentali. Nel secondo caso, si può fissare preliminarmente la *struttura matematica* del modello sulla base di un modello *fisico* semplificato. Successivamente, modificando se necessario la struttura, si possono determinare i valori dei parametri o a calcolo o mediante tecniche di identificazione a partire da prove sperimentali oppure effettuate con simulatori di dettaglio.
Chiaramente, l'accuratezza dei vari sottomodelli va scelta sulla base della loro "importanza" (sensitività, banda passante e così via) rispetto al modello complessivo.

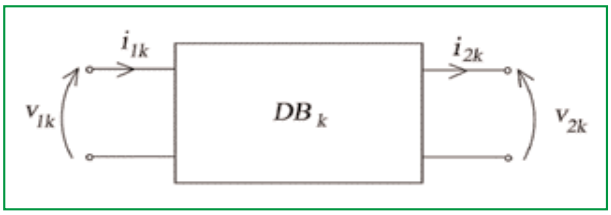

Figura 2a
Doppio bipolo

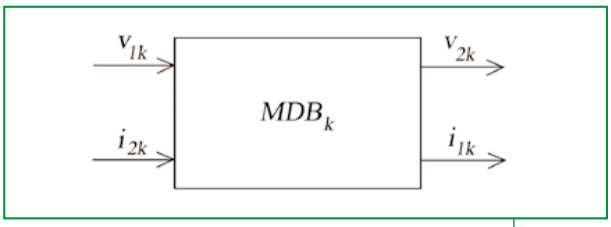

Figura 2b
Modello
doppio bipolo

Applicazioni

La metodologia illustrata può essere utilizzata per la scrittura di modelli interagenti di numerosissime realtà ingegneristiche. Nel seguito il metodo proposto viene illustrato per la scrittura dei modelli di un amplificatore elettronico, del sistema di avviamento di un'autovettura del gruppo Fiat e dell'impianto frenante di un'autovettura, sempre del gruppo Fiat.

Modello amplificatore elettronico

Si consideri lo schema di principio di un amplificatore elettronico riportato in Figura 4, dove I_1 è la corrente di ingresso, V_1 è la tensione di ingresso, I_2 è la corrente di uscita e V_2 è la tensione di uscita. Tale amplificatore può essere utilizzato per *vari* generatori (equivalenti) in ingresso e/o per *vari* carichi (equivalenti) in uscita, come illustrato in Figura 5, dove V_g è la tensione (a vuoto) del generatore, Z_g è l'impedenza (interna) del generatore, V_c è la tensione ai capi del carico e Z_c è l'impedenza del carico. Risulta quindi fondamentale disporre di un modello dell'amplificatore con ingressi e uscite opportunamente "aumentate". A tal proposito, alimentando l'amplificatore in maniera ibrida come in Figura 6a, si può calcolare la matrice di trasferimento del modello associato di Figura 6b:

$$Y = WU \Leftrightarrow \begin{array}{l} I_1 = W_{11}V_1 + W_{12}I_2 \\ V_2 = W_{21}V_1 + W_{22}I_2 \end{array}$$

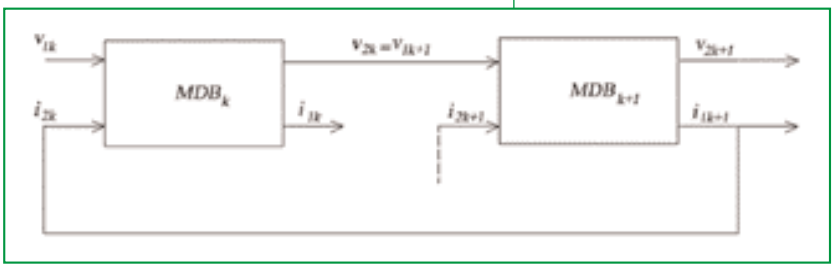

Figura 3 - Assemblaggio del modello del sistema complessivo

Figura 4 - L'amplificatore elettronico

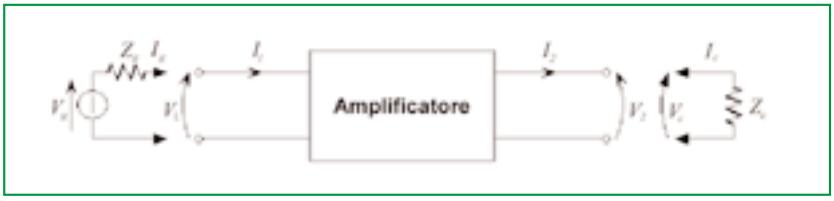

Figura 5 - Modello interagente dell'amplificatore elettronico

Figura 6a
L'amplificatore come doppio bipolo

Figura 6b - Modello dell'amplificatore con ingressi e uscite aumentate

I modelli del generatore e del carico sono descritti, rispettivamente, dalle equazioni seguenti:

$V_1 = V_g - Z_g I_g$,
$V_2 = Z_c I_c$.

Infine, il modello del sistema complessivo si può ottenere assemblando i modelli associati ai singoli sottosistemi componenti (generatore, amplificatore e carico), come illustrato in Figura 7.

Modello del sistema di avviamento di un'autovettura

In [1] è trattato il problema della modellazione e identificazione dell'impianto di avviamento di un auto. Il modello proposto consiste principalmente di tre sotto-modelli interagenti: la batteria, il motorino di avviamento e il motore a scoppio. Ogni modello è caratterizzato da un numero relativamente limitato di parametri e da una struttura matematica relativamente semplice, in modo da descrivere il corrispondente sistema fisico adeguatamente e allo stesso tempo consentirne l'identificazione per mezzo di semplici prove sperimentali.

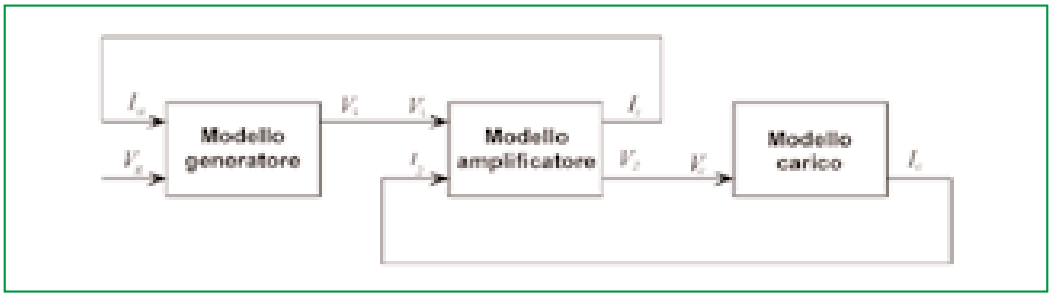

Figura 7 - Assemblaggio del modello complessivo

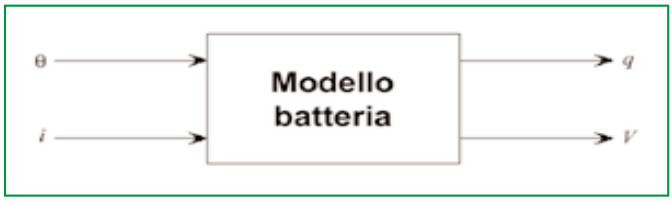

Figura 8 - Modello della batteria

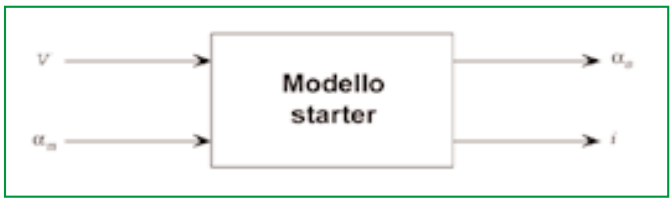

Figura 9 - Modello del motorino di avviamento

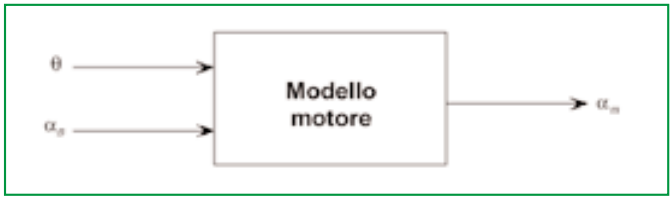

Figura 10 - Modello del motore a scoppio trascinato

Modello della batteria
La batteria è stata modellata con un modello funzionale algebrico, tarato sulla base di prove sperimentali [1], considerando come ingressi la temperatura θ e la corrente erogata i e come uscite lo stato di carica q e la tensione V (Figura 8).

Modello del motorino di avviamento
Il motorino di avviamento o starter di solito è un motore in corrente continua con eccitazione in serie.
Per esso è stato considerato un modello non lineare di tipo ingresso-stato-uscita avente come ingressi la tensione di alimentazione V e la posizione angolare α_m dell'albero del motore a scoppio e come uscite la corrente assorbita i e la posizione angolare α_S del motorino (Figura 9). L'identificazione dei parametri è stata fatta a partire da opportune prove dinamiche a banco [1].

Modello del motore a scoppio

Durante la fase di avviamento, il motore a scoppio viene trascinato; pertanto il suo modello risulta relativamente più semplice.
Sono stati considerati due modelli che si sono rivelati equivalenti esternamente, uno di tipo fisico molto complesso e difficile da tarare, e l'altro funzionale del tipo:

$$\ddot{\alpha}_m = f(\alpha_m, \dot{\alpha}_m, \alpha_S, \theta)$$

con *f* polinomio trigonometrico rispetto a α_m e con coefficienti polinomi algebrici rispetto a $\dot{\alpha}_m$, α_S e θ (Figura 10). L'identificazione dei parametri del modello del motore a scoppio è stata fatta a partire da prove sperimentali su un sistema di avviamento completo, con batteria e motorino di avviamento identificati come in precedenza. Il modello del sistema complessivo può essere ottenuto assemblando i vari sotto-modelli, come in Figura 11. L'approccio presentato ha consentito di modellare efficacemente il sistema di avviamento di un'autovettura Fiat, equipaggiata con una batteria Marelli 40 Ah, un motorino di avviamento Marelli 0,9 kW e un motore Fire 1.242 cc.
Nella Figura 12 sono messi a confronto gli andamenti sperimentali della velocità angolare dell'albero motore e della corrente assorbita dal motorino con quelli forniti dal simulatore, con modello del motore a scoppio a due armoniche e coefficienti di primo grado. È da notare che le piccole differenze iniziali sono dovute alla mancanza di conoscenza dell'angolo iniziale dell'albero motore e della pressione residua nei cilindri.

Modello dell'impianto frenante di un'autovettura

La metodologia proposta in questo lavoro è stata utilizzata anche per la formulazione di un simulatore dinamico in forma "parametrica" dell'impianto frenante di un'autovettura del gruppo Fiat. Il simulatore è basato sui modelli delle parti più importanti del sistema frenante (Figura 13): pedale, servofreno, pompa, correttore, circuiti frenanti, freni, auto, Abs [5, 6]. Sebbene i vari sottosistemi siano interagenti, i loro modelli sono stati formulati in modo da poter essere aggiornati indipendentemente e/o utilizzati in altri simulatori. Inoltre, ogni modello (fisico o funzionale) è caratterizzato da un numero minimo di parametri (geometrici, fisici, globali) e da una struttura matematica relativamente semplice, in modo da poter descrivere bene il relativo sistema fisico e nello stesso tempo poter essere identificato con prove dinamiche relativamente semplici e/o con i relativi dati di targa forniti dalla casa costruttrice. In particolare, sulla base di alcuni dati dei pneumatici e delle pasticche e mediante pesature e

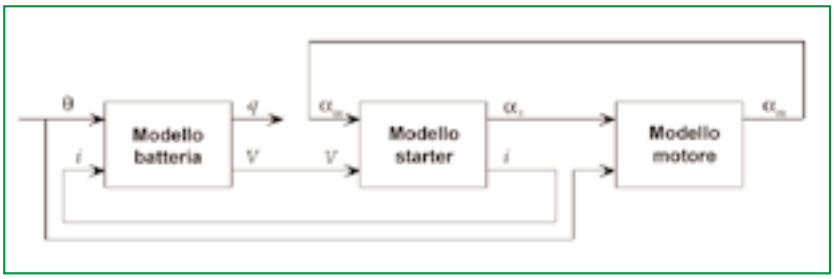

Figura 11 - Assemblaggio del modello complessivo del sistema di avviamento di un'autovettura

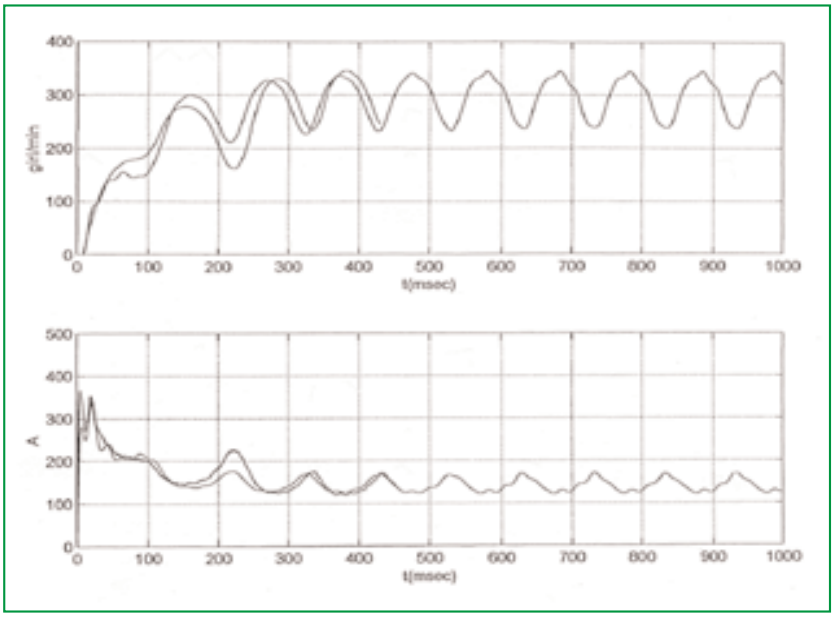

Figura 12 - Prova di avviamento: velocità angolare dell'albero motore (misurata e calcolata) e corrente assorbita dal motorino di avviamento (misurata e calcolata)

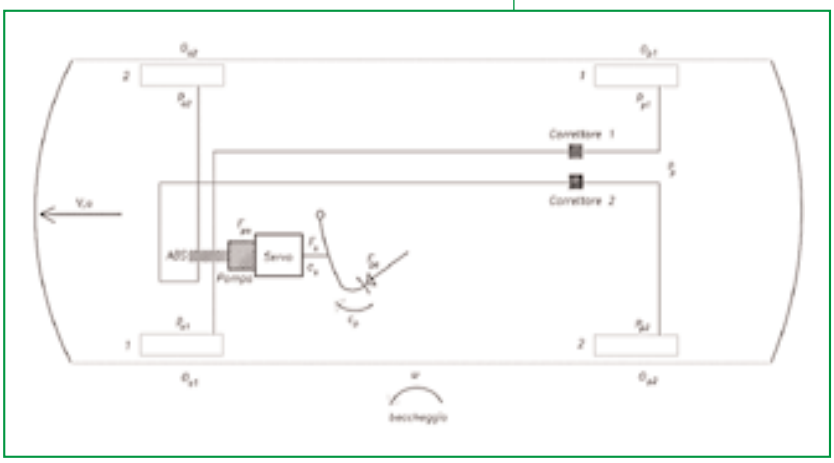

Figura 13 - Il sistema frenante di un'autovettura

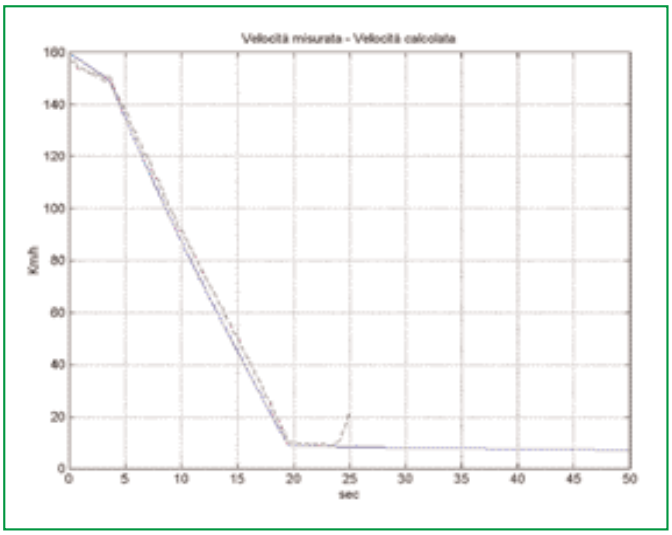

Figura 14a - Andamento della velocità dell'auto in frenata (misurata e calcolata)

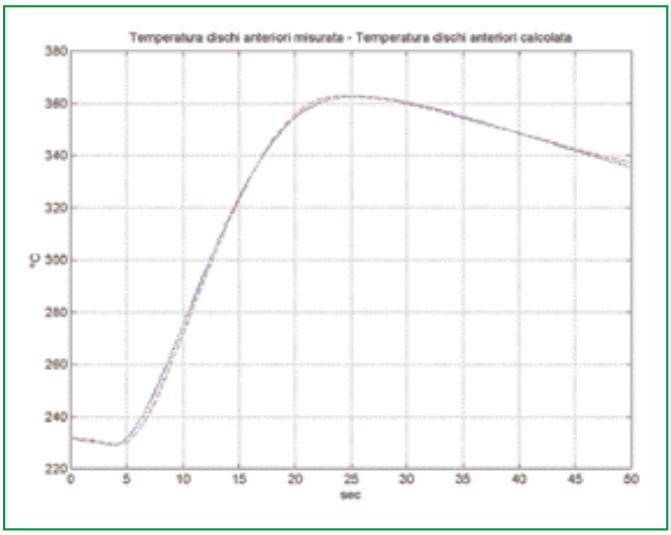

Figura 14b - Andamento della temperatura dei dischi anteriori (misurata e calcolata)

prove sperimentali di sollecitazione delle sospensioni, di arresto libero, di eccitazione del beccheggio, di funzionamento quasi-statico del sistema pedale-servo-pompa, di frenate, di riscaldamento dei dischi e dei pattini mediante frenate, con tecniche di identificazione ad hoc, sono stati ottenuti i parametri del simulatore ed è stata effettuata la sua validazione (Figure 14a,b). Con il simulatore validato si possono effettuare diverse prove di valutazione delle prestazioni dell'impianto frenante, in termini di sollecitazioni meccaniche e termiche, di spazio e tempo di frenata ecc., in varie condizioni operative e/o con diversi parametri dei componenti. Nelle Figure 15a,b, a titolo illustrativo, si riportano alcuni risultati del simulatore. Infine si evidenza come il simulatore sviluppato:

- consente di ottimizzare la scelta e/o il dimensionamento dei vari componenti dell'impianto;
- consente di valutare le condizioni operative dei vari componenti e quindi di definire l'affidabilità di essi, passo fondamentale per valutare l'affidabilità dell'intero impianto;
- può essere utilizzato in altri simulatori, in particolare in simulatori per la progettazione e/o la validazione dell'Abs, sia per la parte hardware sia software;
- costituisce anche un valido punto di partenza per implementare apparecchiature di diagnosi dell'impianto frenante.

Nella Figura 16 è riportato lo schema Simulink del simulatore proposto per l'impianto frenante.

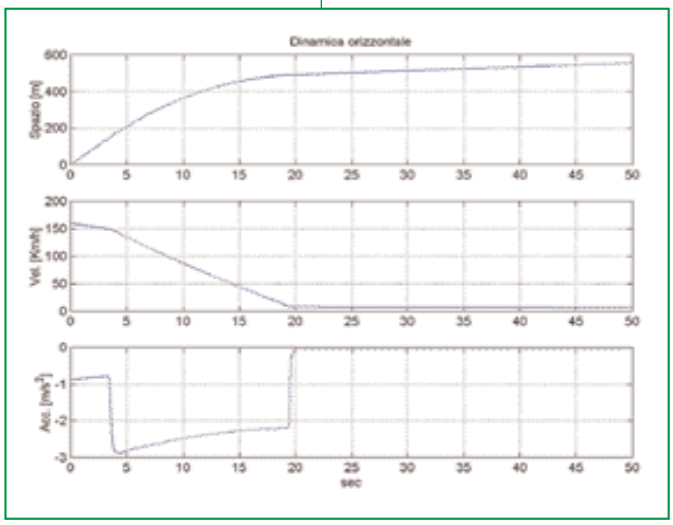

Figura 15a - Spazio, velocità e accelerazione dell'auto in frenata simulata

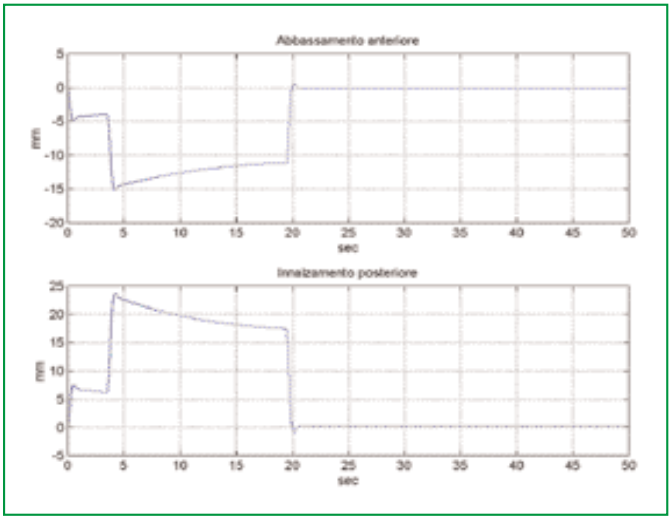

Figura 15b - Spostamenti verticali della carrozzeria lato anteriore e posteriore in frenata simulata

Bibliografia

[1] F. Amato, G. Celentano, R. Iervolino, D. Freni, *Modelling and experimental validation of a car starting system,* Proceedings of the 3rd Ifac Workshop on Advances in Automotive Control, Karlsruhe, Germania, Marzo 2001.

[2] G. Celentano, R. Iervolino, *Modellistica e simulazione dell'impianto frenante di un'autovettura per la valutazione delle prestazioni e l'interpretazione delle difettosità,* Rapporto Interno Elasis, Dicembre 2000.

[3] G. Celentano, R. Iervolino, *Sviluppo di un modello funzionale di un impianto frenante tipo per valutare la qualità percepita dal cliente e l'affidabilità in funzione delle caratteristiche dei componenti più significativi,* Rapporto Interno Elasis, Dicembre 2001.

[4] R. Murray-Smith, T.A. Johansen, *Multiple model approaches to nonlinear modeling and control*, Taylor&Francis, Inc., Hants (UK),1997.

[5] Bosch R., *Automotive Handbook*, Robert Bentley Publishers, 4a Edizione, 1997.

[6] Raza H., Xu Z., Yang B., Ioannou P., *Modeling and control design for a computer-controlled brake system,* Ieee Transactions on Control System Technology, vol. 5, no. 3, May 1997.

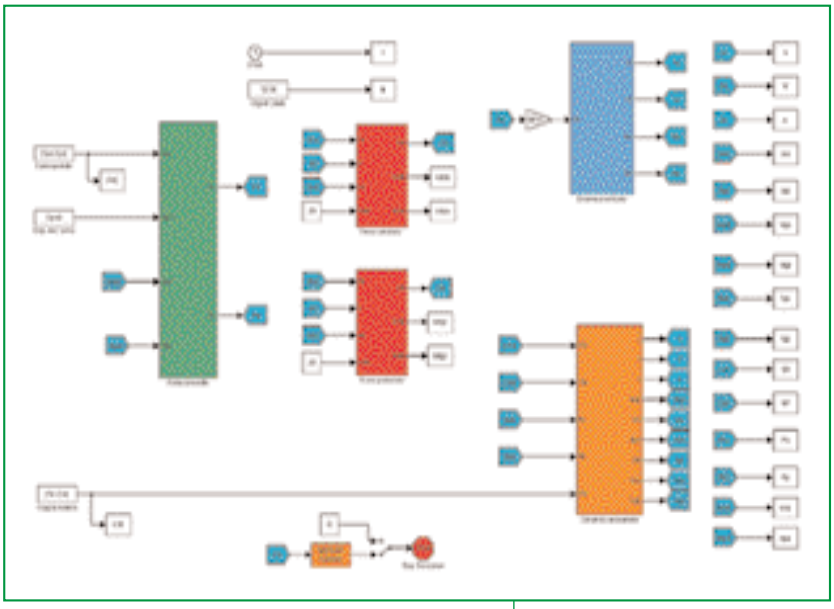

Figura 16 - Il simulatore dell'impianto frenante