

ACUSYS - APPLICATION OF MATLAB/SIMULINK FOR THE SIMULATION OF ACOUSTIC PULSATIONS WITHIN PLANTS

Ing. Attilio Brighenti

Systems and Advanced Technologies Engineering - Venice (Italy)

ACUSYS is an application software developed with **MATLAB/SIMULINK™**, that simulates the stationary and transient response of the fluid medium inside a piping network, induced by pressure or flow pulsations applied to discrete points.

This analysis is of greatest interest for:

- gas compression plants, particularly when reciprocating machines are used, such as to perform analyses following API 618 rules (approaches 2 and 3);
- liquids and pseudo-homogeneous multiphase fluids pumping plants;
- design and optimisation of inlet and exhaust gas ducts for ICE and combustion chambers.

ACUSYS simulates the fluid medium as a monodimensional linear wave-field (electro-acoustic analogy), bounded in structurally rigid pipes and containers, including valves, filters and piping accessories, which is normally applicable in the cited fields. All pipes are discretised into a number of finite tubular elements, suitable to describe with assigned error tolerance all response eigenvectors having eigenvalues within the frequency bandwidth of interest. The program operates on a pre-defined library of configurations, easily expandable, allowing a broad set of plants to undergo parametric analysis. The analysis can be performed both on the **transfer functions** defined by all input-output sections of the configuration and on the **response** to a variety of input signals, including simple sinusoidal, square, saw-tooth and arbitrarily defined signals, either by duty-cycle shape definition or digital signals in the frequency or time domain.

ACUSYS is a user friendly program fully managed by graphical user interfaces; results can be plotted, printed in graphical or tabular form and exported into files for post processing, such as for dynamic analyses of the plant's structure.

ACUSYS runs on any hardware platform compatible with **MATLAB/SIMULINK**, such as PCs, Apple-MacIntosh, Convex, Cray™.

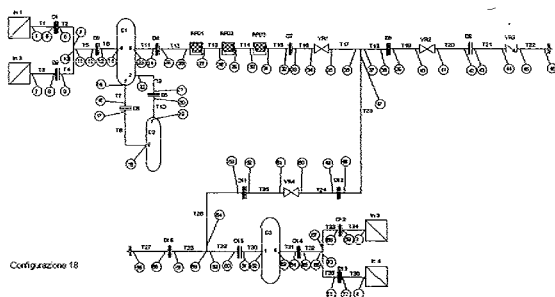


Fig. 1 - Example of plant's configuration analysed by **ACUSYS**

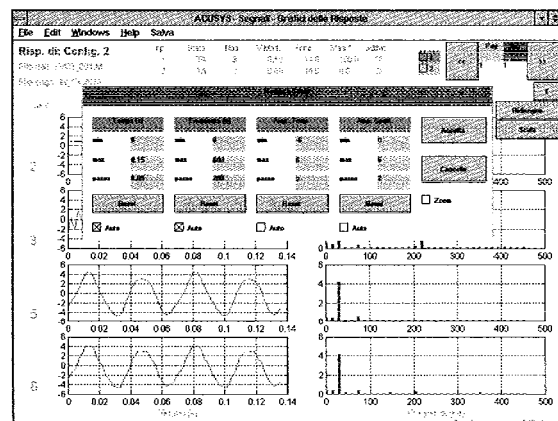


Fig. 2 - **ACUSYS** - Response window

ACUSYS - APPLICAZIONE DI MATLAB/SIMULINK PER LA SIMULAZIONE DELLE PULSAZIONI ACUSTICHE NEGLI IMPIANTI

Ing. Attilio Brighenti

Ingegneria dei Sistemi e Studio di Tecnologie Avanzate - Venezia

1. SOMMARIO

ACUSYS è un software applicativo, per **MATLAB/SIMULINK™**, che simula la risposta dinamica stazionaria e transitoria¹ del mezzo fluido contenuto in un impianto, sollecitato da pressioni o portate variabili applicate in punti discreti. Campi applicativi tipici di questa analisi sono quello degli impianti di compressione e pompaggio di fluidi, soprattutto con macchine alternative, e il progetto e l'ottimizzazione dei condotti di aspirazione e scarico di motori alternativi o camere di combustione. **ACUSYS** opera ipotizzando il mezzo fluido confinato in tubazioni e recipienti rigidi strutturalmente, con relativi accessori di linea, secondo schemi di configurazione e parametri di dimensionamento definiti rispettivamente in una libreria espandibile e in file di input. Il modello matematico si basa inoltre sull'ipotesi di campo di propagazione monodimensionale e lineare, normalmente valido nelle applicazioni citate.

2. INTRODUZIONE

ACUSYS risponde soprattutto all'esigenza di valutare, sia durante la progettazione di un impianto a fluido che in occasione di modifiche ad impianti esistenti, la possibilità che insorgano pericolose o rumorose vibrazioni delle tubature e dei componenti dell'impianto, oppure scadimenti delle prestazioni delle macchine motrici o operatrici, per interazioni dinamiche con i condotti, sia transitorie che stazionarie. Le vibrazioni possono essere eccitate non solo da elementi rotanti non equilibrati, ma da eventuali risonanze tra le pulsazioni di pressione o portata generate nel fluido dalle macchine connesse all'impianto (pompe, compressori, motori termici) e la struttura costituita dall'impianto stesso, ovvero l'insieme di tubazioni, contenitori, supporti.

ACUSYS è uno strumento realizzato proprio per permettere di analizzare e prevenire quest'ultimo genere di vibrazioni, attraverso la caratterizzazione del campo acustico interno all'impianto.

¹ Quest'ultima nella versione estesa.

Il campo applicativo tipico di questa analisi è quello degli impianti di compressione e pompaggio di gas e liquidi, soprattutto con macchine alternative, o fluidi multifase pseudo-omogenei.

Il problema delle vibrazioni degli impianti è sentito soprattutto dall'industria petrolifera, nella produzione di olio e gas, nella compressione del gas, nelle raffinerie, dove macchine alternative e centrifughe sono largamente impiegate. Di tale esigenza vi è un evidente riflesso nelle norme API 618, che prevedono esplicitamente di verificare che le pulsazioni di pressione generate nell'impianto dalle macchine operatrici non superino valori di ca. il 3% della pressione nominale². Per tale verifica sono anche previsti tre livelli di approfondimento, uno più semplice, basato su calcoli limitati ad una zona specifica dell'impianto e due, raccomandati per gli impianti più complessi, che consistono nella simulazione dinamica dell'impianto, quale mezzo continuo, a rete di elementi monodimensionali, di propagazione delle onde acustiche.

Anche altri settori sembrano sensibili a questo problema, come quello degli impianti termici a vapore, dove eventuali elevate vibrazioni indotte da pompe centrifughe di alimentazione delle caldaie possono avere conseguenze rilevanti sulla sicurezza degli impianti.

Il modello propagatorio alla base di *ACUSYS* può essere utilizzato sia per l'analisi della risposta stazionaria del sistema, sia per la risposta ai transitori, come, ad esempio per la valutazione dei colpi d'ariete.

In questa memoria si illustra più in dettaglio la *versione base* di questa applicazione combinata di MATLAB e SIMULINK, che è indirizzata all'analisi stazionaria di un'ampia famiglia di impianti, definiti secondo le esigenze del cliente prima della fornitura. Essa è stata già fornita in licenza d'uso ad un'importante industria italiana produttrice di impianti e macchine per la compressione di gas.

ACUSYS è utilizzabile su tutte le piattaforme hardware con cui MATLAB-SIMULINK sono compatibili, quindi dai PC e Apple-MacIntosh™ ai Convex e Cray³.

3. DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

Un esempio elementare che spiega il problema risolvibile con *ACUSYS* è illustrato in fig. 1. Un compressore alternativo, monocilindrico nell'esempio, è collegato ad un serbatoio accumulatore attraverso una tubazione.

Il compressore, come noto, eroga alla mandata una portata variabile ciclicamente ed avente una componente armonica fondamentale di frequenza pari al numero di cicli di compressione nell'unità di tempo. Se il compressore è a semplice effetto, tale frequenza coincide con il numero di giri al secondo. In realtà l'andamento della portata generata dal compressore all'imbocco della tubazione e la conseguente pressione che si genera per reazione in tale sezione ha un andamento temporale non puramente sinusoidale, ma ugualmente descrivibile come somma di più segnali sinusoidali, aventi frequenze multiple di quella fondamentale.

² La soglia accettabile non è in realtà fissa ma dipende dalle caratteristiche dell'impianto.

³ MATLAB, SIMULINK, MS-Excel, Apple-MacIntosh, Convex e Cray sono marchi registrati di proprietà dei relativi produttori.

La variazione di pressione, ovvero il segnale di ingresso, si propaga nel condotto secondo un campo di onde piane con armoniche aventi lunghezze d'onda inversamente proporzionali alle rispettive frequenze del segnale di ingresso⁴.

Se si verifica che, ad esempio a certe velocità del compressore, la lunghezza della tubazione sia pari ad un multiplo dispari di una mezza lunghezza d'onda, l'estremità sinistra si trova con il fluido soggetto alla massima oscillazione di pressione mentre l'altra estremità è a pressione pressoché costante, in quanto collegata ad un serbatoio di grande volume. In tali condizioni si verifica allora una forza netta assiale pulsante, esercitata sulla parete di confinamento del gas, ovvero sulle curve di raccordo collegate al tubo dal lato del compressore che determinerà una vibrazione del tubo e dei componenti ad esso collegati, anche in risonanza strutturale qualora non siano previsti opportuni vincoli. Oltre a queste azioni vanno poi considerate quelle dovute alla variazione pulsante di quantità di moto nelle curve o derivazioni dei condotti.

Questo esempio è particolarmente semplice da analizzare, mancando tubazioni in derivazione, o ad anelli chiusi, accessori di linea, come valvole, diaframmi, filtri, etc. che possono alterare e rendere più complesso il campo acustico all'interno dell'impianto (Fig. 2). In determinati casi è necessario provvedere alla installazione di filtri acustici anche semplicemente costituiti da accumulatori di opportune dimensioni e posizione che permettano di abbattere l'ampiezza della pressione pulsante trasmessa lungo l'impianto e le forze conseguenti, soprattutto delle armoniche con frequenze prossime a quelle proprie strutturali.

Con **ACUSYS** si è mirato a permettere l'analisi anche di questi importanti casi più complessi, non sempre alla portata di accorgimenti intuitivi.

4. MODELLO MATEMATICO

Il modello matematico di un impianto, realizzato in **ACUSYS** con MATLAB e SIMULINK, è sostanzialmente un modello ad elementi finiti del campo monodimensionale di propagazione. Questa ipotesi di propagazione ad onde piane è valida quando la lunghezza d'onda sia sufficientemente maggiore del diametro del tubo o della dimensione caratteristica ortogonale alla direzione di propagazione, ovvero, in formula approssimata, quando:

$$1) \quad f_{max} \leq f_{lim} \cong 0.6 \frac{a}{D}$$

dove f_{max} è la frequenza della più alta componente armonica di interesse del segnale, a la velocità del suono locale nel mezzo e D la dimensione massima del condotto ortogonalmente alla direzione di propagazione. Questa è una condizione normalmente verificata negli impianti di compressione, per le armoniche che creano problemi di vibrazione strutturale.

Oltre all'ipotesi di propagazione a fronti d'onda piani la versione base di **ACUSYS** opera nell'ipotesi di relazione lineare tra le ampiezze delle variazioni di pressione e di velocità locali del fluido, valida quando quest'ultima e la velocità media del fluido siano

⁴ La condizione di mezzo non dispersivo è normalmente verificata in queste applicazioni.

abbastanza piccole rispetto alla velocità del suono. A questa condizione è valida l'analogia elettro-acustica, riconducibile alle seguenti equazioni di continuità e della quantità di moto applicate ad un tubo elementare di sezione costante tra le sezioni 1 di ingresso e 2 di uscita:

$$2) \quad \frac{dp_2}{dt} = \frac{1}{C} (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) \qquad 3) \quad \frac{d\dot{m}_1}{dt} = \frac{1}{L} (p_1 - p_2)$$

$$C = \frac{A \Delta x}{\alpha^2} \qquad L = \frac{\Delta x}{A}$$

\dot{m}, p = portata e pressione del fluido nelle sezioni (1 e 2), t = tempo

A = area della sezione trasversale del condotto

Δx = lunghezza dell'elemento

α = velocità del suono nell'elemento

Si può dimostrare che per una singola componente sinusoidale questa ipotesi lineare è valida quando il rapporto α_{max} definito dalla seguente equazione è sufficientemente piccolo.

$$4) \quad |\alpha|_{max} = \left| \frac{u \frac{\partial u}{\partial x}}{\frac{\partial u}{\partial t}} \right|_{max} = \frac{1}{\gamma} \frac{\bar{p}}{p_0} = \frac{\bar{u}}{\alpha}$$

u, p = velocità e pressione del fluido

γ = rapporto dei calori specifici a p e v costante del fluido

$\bar{\quad}$ indica l'ampiezza di variazione

0 indica il valore medio

In pratica per gli impianti di compressione di gas, affinché le norme API 618 siano soddisfatte in base al criterio su accennato, tale condizione viene verificata necessariamente, con $\alpha_{max} \cong 0.03/\gamma$.

Il modello matematico così sommariamente descritto è realizzato combinando opportunamente le potenzialità di SIMULINK, quale strumento flessibile per la creazione di architetture di impianti con quelle di MATLAB, quale linguaggio matematico particolarmente versatile ed efficiente nell'analisi matriciale, per la generazione delle matrici di stato dei macroelementi della libreria dei componenti, come tubi, capacità, etc. (Fig. 3).

Il componente base di ACUSYS, il tubo, viene descritto in SIMULINK come un blocco di equazioni di stato che sintetizza le caratteristiche di tutti gli elementi discreti che lo compongono. La funzione che lega input e output di ogni blocco tubo viene ricavata preliminarmente da MATLAB, che discretizza tale tubo in un numero di elementi finiti di uguale lunghezza, sufficienti per una corretta descrizione della caratteristica dinamica del sistema. Nel caso di analisi lineare MATLAB ricava le matrici di stato

(A,B,C,D) di ogni tubo e degli altri componenti facenti parte della configurazione di impianto⁵.

Queste matrici sono di dimensioni sufficientemente grandi da poter descrivere tutti i modi di ogni tubo significativi per l'analisi globale, fino alla frequenza massima definita in input⁶, ma permettono di limitare le variabili di stato esplicitate alle sole pressioni e portate all'ingresso ed all'uscita del tubo. Le matrici di stato sono poi utilizzate nei blocchi *state-space* che compaiono nell'**S-file** generato da SIMULINK (Fig. 4), per calcolare le matrici di stato dell'intero sistema e le funzioni di trasferimento globali.

In questo modo si svincola la discretizzazione dell'impianto dallo schema SIMULINK, che rimane inalterato qualunque sia il numero di elementi dei singoli tubi, che può essere variato da caso a caso.

In SIMULINK viceversa si possono generare, partendo da una configurazione già definita o, più in generale, dalla libreria di componenti base (tubi, valvole, collettori, capacità, etc.) varianti e nuovi schemi, avendo la sola accortezza di collegare correttamente le porte di ingresso e uscita dei vari blocchi, che rappresentano le variabili di stato.

5. CONFIGURAZIONI TIPICHE DI IMPIANTO ED IMPIEGO DI ACUSYS

In Fig. 2 sono rappresentati due esempi di configurazione di impianto, di differente livello di complessità, che vengono forniti come libreria di sistemi. Con opportuna assegnazione dei dati di input i componenti presenti nella configurazione possono essere resi inefficaci (ad es. i filtri o gli scambiatori), consentendo perciò l'analisi di una ben più ampia gamma di varianti d'impianto.

Ogni sezione numerata corrisponde ad un punto per il quale vengono calcolate le funzioni di trasferimento e le risposte. Tali sezioni, in funzione delle lunghezze assegnate agli elementi tubo che le interconnettono, possono rappresentare un punto qualsiasi del ramo di impianto a cui appartengono. Se ad esempio si vorrà determinare la posizione ottimale di un diaframma o di un filtro capacitivo in un ramo di impianto, si potranno effettuare calcoli successivi, assegnando ai tubi T_i lunghezze diverse e complementari a due a due.

L'impiego di **ACUSYS** è semplice, anche per utenti non ancora addestrati all'impiego di MATLAB-SIMULINK, in quanto nessuna delle istruzioni e degli schemi gestiti dai due ambienti viene portato ad interagire con l'operatore, salvo che questi non lo comandi espressamente. L'operatore interagisce con l'ambiente MATLAB solo all'avvio di **ACUSYS** dalla finestra di comando di MATLAB con il semplice comando:

acusys <invio>

Successivamente tutte le operazioni vengono gestite da finestre grafiche, realizzate con le utilities "Graphic User Interface" di MATLAB (Figg. da 5 a 10). Esse permettono

⁵ Anche i componenti capacitivi, con due o più connessioni (quali filtri reattivi e collettori) sono descritti con combinazioni opportune di componenti tubo in serie/parallelo che permettono di considerare anche ritardi e amplificazione/smorzamento di propagazione all'interno di tali componenti.

⁶ **ACUSYS** utilizza automaticamente una funzione di impostazione della massima lunghezza di elemento finito ottenuto in modo che l'errore sul calcolo dell'autovalore più prossimo alla massima frequenza di interesse non ecceda una soglia assegnata (2,5,10%).

anche la visualizzazione dei risultati in forma grafica (con assegnazione delle scale manuale o automatica, zoom) o tabulare.

Infine tutti i risultati possono essere stampati o salvati su file in formato testo per essere esportati e utilizzati in altri ambienti, ad esempio MS-Excel, Lotus, SAP etc., per presentazioni personalizzate o successive rielaborazioni, ad esempio analisi dinamiche strutturali.

[1] Carli R., Casale P., *Simulation of Pressure Pulsations in Gas Compression Plants*, Quaderni Pignone 3, pp. 25-32.
 [2] D'Azzo J. J., Houpis C. H., *Linear Control System Analysis and Design - Conventional and Modern*, 3rd Ed., McGraw Hill Int. Ed., 1988.
 [3] Seto William W, *Acustica* - Ed. Schaum- ETAS libri, 1978.
 [4] Smeulers J.P.M., *Simulation of Flow Dynamics in Pipe Systems*, Proceedings IMechE Seminar Dec. 1988, pp. 97-105.
 [5] The Mathworks Inc., *MATLAB/SIMULINK - User manuals*, 1992/1993.
 [6] Thomson W.T., *Theory of Vibration with Application*, Prentice-Hall, Inc., 1972.
 [7] Van Bokhorst E., Korst H., *The Centrifugal Pump as a Source of Pulsations in Pipe Systems - a Comparison of Measurements and Simulation Results*, IMechE C449/008 1993, pp. 83-91.

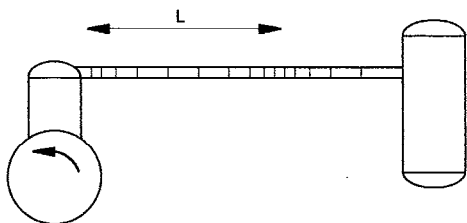


Fig. 1 - Esempio di generazione e propagazione delle pulsazioni di pressione (L = lunghezza d'onda)

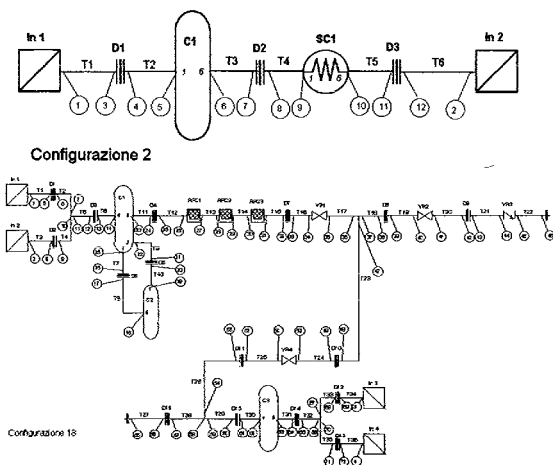


Fig. 2 - Esempi di configurazione di impianto della libreria realizzabili con ACUSYS

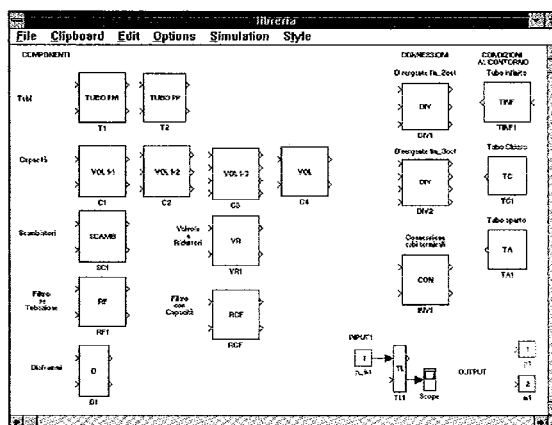


Fig. 3 - Libreria di componenti di ACUSYS

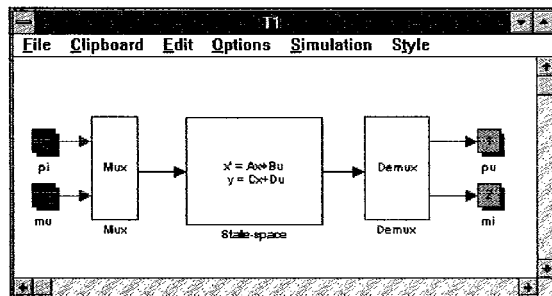


Fig. 4 - Esempio di struttura interna di un blocco componente utilizzato negli S-file SIMULINK di ACUSYS (elemento tubo con ingresso in pressione e portata)

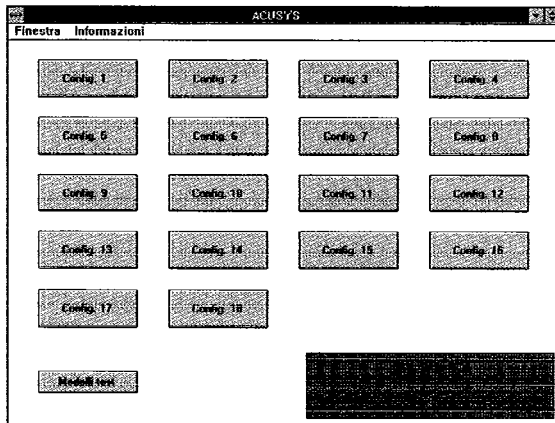


Fig. 5 - ACUSYS - Finestra di selezione della configurazione

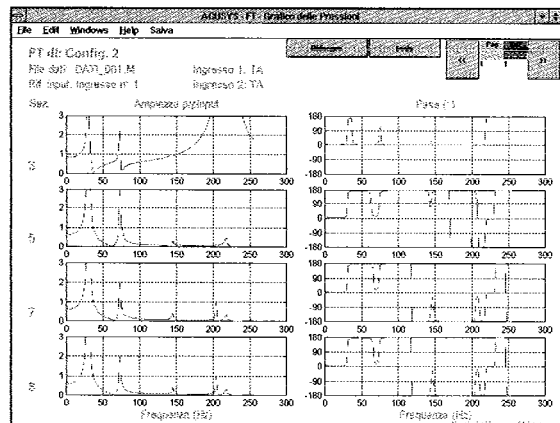


Fig. 8 - ACUSYS - Finestra FT - Grafico pressioni

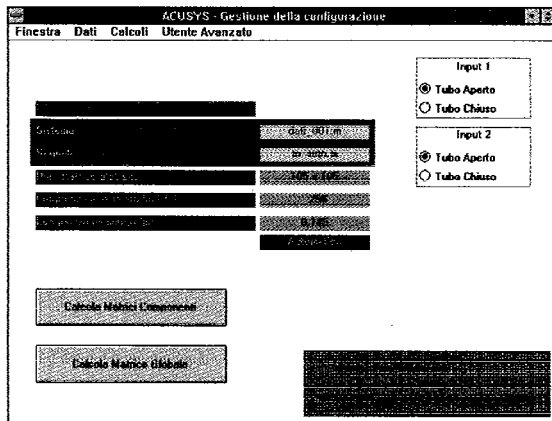


Fig. 6 - ACUSYS - Finestra di gestione della configurazione

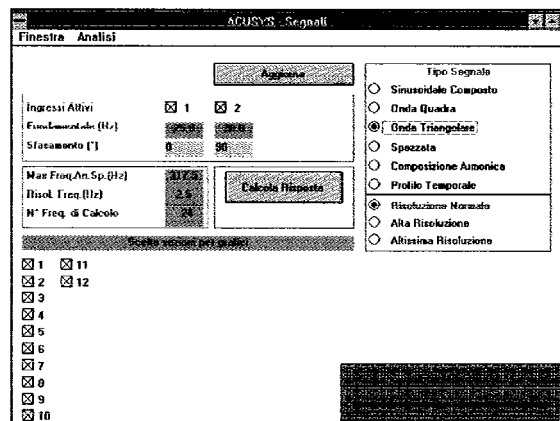


Fig. 9 - ACUSYS - Finestra di gestione segnali

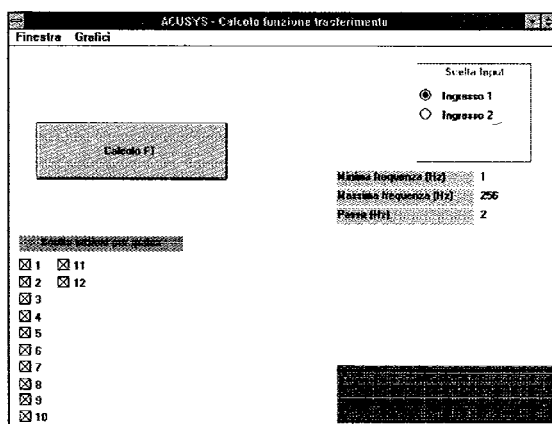


Fig. 7 - ACUSYS - Finestra di gestione calcolo funzione di trasferimento

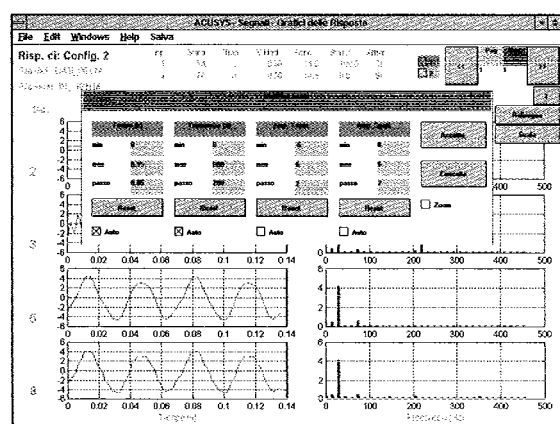


Fig. 10 - ACUSYS - Finestra Risposta (sovrimpressa la finestra di gestione scale e zoom)