

# SIMULAZIONE MATEMATICA DELLA RISPOSTA NON LINEARE DI ALTOPARLANTI: MODELLO NUMERICO E VERIFICA SPERIMENTALE

Angelo Farina\* , Emanuele Ugolotti\*\*

\* Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma  
\*\* RCF - Radio Cine Forniture S.p.A.

(Ricevuto: dicembre 1994)

*In questo lavoro viene anzitutto sviluppata l'analisi matematica del trasduttore elettro-meccano-acustico mediante la teoria dei circuiti elettrici equivalenti in regime lineare, che consente di ottenere le equazioni caratteristiche del sistema in funzione del segnale elettrico applicato ai morsetti.*

*Dopo una accurata analisi delle cause di risposta non lineare, le equazioni caratteristiche vengono modificate, introducendo termini di risposta non lineare. Le stesse vengono impiegate in un modello numerico della risposta ai transienti, che consente la rappresentazione diretta nel dominio del tempo della risposta di un altoparlante in regime non lineare.*

*La veridicità delle previsioni ottenute con tale modello è stata verificata mediante confronto con rilievi sperimentali.*

*La sperimentazione, eseguita presso la camera anecoica della ditta R.C.F. - S.p.A. di Reggio Emilia, ha riguardato la risposta a bassa frequenza di un woofer, dotato di un dispositivo per la riduzione delle non linearità denominato "freno elettrodinamico".*

*I risultati mostrano come il modello numerico descriva correttamente le non linearità in assenza di intervento dell'organo frenante, e come altresì risulti corretta anche la previsione dell'effetto "linearizzante" di quest'ultimo.*

## MATEMATICAL SIMULATION OF THE NON LINEAR RESPONSE OF LOUDSPEAKERS: NUMERICAL MODEL AND EXPERIMENTAL VERIFICATION

*In this paper the equivalent electrical circuit theory is first employed for the mathematical analysis of the electro-mechano-acoustical transducer in linear behaviour: by this technique it is possible to obtain the characteristic equations, yielding the acoustic pressure response to the electrical signal connected to the loudspeaker terminals.*

*After an accurate analysis of the causes that produce a non linear response, the characteristic equations are modified, introducing non linear terms. These modified equations are employed in a numerical model for the transient response calculation: it produces the time-domain pressure response of a loudspeaker excited outside its linear boundary.*

*The accuracy of the numerical previsions has been checked against experimental results, obtained in the anechoic chamber of RCF. The experiments were conducted on a woofer equipped with an "electrodynamical brake", that is a device capable (when inserted) of reducing the nonlinearities.*

*The results show that the numerical model correctly describes the heavy nonlinearities that arise when the brake is excluded, and the simulation is still correct also about the "linearizing" effect of this brake.*

### 1. Modello matematico di un trasduttore elettroacustico

#### 1.1 Funzionamento lineare e circuito equivalente globale

Per individuare i singoli sistemi fisici che compongono un altoparlante e le interazioni che intercorrono tra le variabili dello stesso sistema e tra sistemi diversi, si impiega il metodo dei circuiti elettrici equivalenti, rappresentanti ogni singolo sistema, che

portano all'ottenimento del circuito elettrico equivalente globale ([3], [4]).

Nel caso dell'altoparlante si individuano tre sistemi fisici: 1) elettrico, costituito dalla bobina immersa nel campo magnetico, collegata ai morsetti esterni; 2) meccanico, costituito dalla parte mobile, massa della membrana e massa della bobina, e dalle parti che collegano quest'ultima con la struttura fissa;

3) acustico, costituito dalla massa d'aria spostata dalla membrana durante il movimento. Ognuno di questi sistemi ammette il proprio circuito elettrico equivalente, dove ogni simbolo ha una precisa rispondenza fisica ([1]). Il sistema elettrico è sintetizzato da una resistenza elettrica  $R_e$  e da una induttanza  $L_e$ , il sistema meccanico da una massa mobile  $M_m$ , da una cedevolezza  $C_m$ , e da una resistenza  $R_m$ , il sistema acustico dall'impedenza di radiazione  $Z_a$ , dipendente quest'ultima dalla frequenza del suono emesso ([2]). Ognuno di questi elementi fisici viene rappresentato graficamente ed entra a far parte del circuito ad esso competente, secondo la rappresentazione che si sceglie, a sua volta determinata dalla assegnazione delle variabili ([5]).

Si può così tracciare il circuito elettrico equivalente di tutti e tre i sistemi che compongono l'altoparlante, come riportato in fig. 1. Da quest'ultimo, applicando la teoria dei circuiti elettrici, si perviene al circuito elettrico equivalente globale, proposto da Small e riportato nella fig. 2.

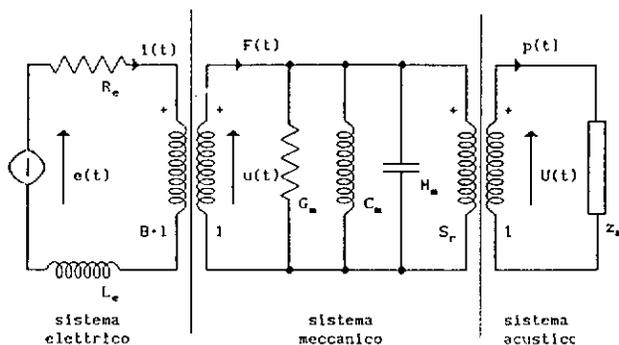
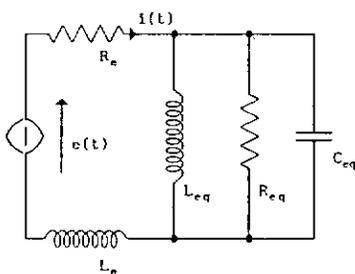


Fig. 1 - Circuito elettrico equivalente di un altoparlante.



$$R_{eq} = (G_a^{-1} S_r^{-2} + G_m^{-1})^{-1} (B \cdot I)^2 \quad (1)$$

$$L_{eq} = (C_a^{-1} S_r^{-2} + C_m^{-1})^{-1} (B \cdot I)^2 \quad (2)$$

$$C_{eq} = (M_a S_r^2 + M_m) (B \cdot I)^{-2} \quad (3)$$

Fig. 2 - Circuito elettrico semplificato a parametri concentrati.

L'ottenimento del circuito equivalente globale prende le mosse dall'ipotesi accennata di linearità,

che si traduce nell'idealizzare l'altoparlante: si suppone che la bobina sia sempre investita da un campo magnetico costante, che le sospensioni forniscano la stessa elasticità, che la membrana non si deformi e si comporti alla stregua di un disco rigido per qualsiasi valore di frequenza e di intensità del segnale da trasdurre.

Dove  $C_a$ , cedevolezza acustica,  $M_a$ , massa acustica,  $G_a$ , conduttanza acustica, fanno parte dell'impedenza di radiazione  $Z_a$  ( $Z_a^{-1}$ ) e dipendono dalla frequenza del segnale ([1], [2], [4], [5]), mentre  $M_m$ , massa meccanica,  $G_m$ , conduttanza meccanica,  $C_m$ , cedevolezza meccanica, il prodotto  $B \cdot I$ , induzione all'intraferro · lunghezza del conduttore,  $S_r$ , superficie di radiazione, dipendono dalle particolarità costruttive, dai materiali impiegati e, come si vedrà, dallo spostamento.

## 1.2 Equazioni lineari del moto

Dal circuito equivalente riportato in fig. 2, avendo preso  $x$  come ascissa e direzione del moto, che è assiale, si perviene alla equazione differenziale seguente, nell'ipotesi che l'altoparlante funzioni in regime lineare:

$$\alpha x + \beta \frac{dx}{dt} + \gamma \frac{d^2 x}{dt^2} + \delta \frac{d^3 x}{dt^3} = e(t) \quad (4)$$

dove i coefficienti sono dati nel seguente modo ([5])

$$\alpha = \frac{R_e (B \cdot I)^2}{L_{eq} B \cdot I}; \quad (5a)$$

$$\beta = \frac{R_e R_{eq} B \cdot I + (B \cdot I)^2 + \frac{L_e (B \cdot I)^2}{L_{eq}}}{B \cdot I};$$

$$\gamma = \frac{L_e R_{eq} B \cdot I + C_{eq} (B \cdot I)^2 R_e}{B \cdot I};$$

$$\delta = \frac{L_e C_{eq} (B \cdot I)^2}{B \cdot I} \quad (5b)$$

L'equazione (4) può essere integrata e fornire l'andamento temporale dello spostamento in funzione della particolare eccitazione  $e(t)$ , che si identifica con il segnale elettrico che proviene da un amplificatore di potenza.

In particolare si possono studiare le risposte a regime ed in transitorio.

A regime sinusoidale si ha:

$$e(t) = E_0 \sin \omega t \quad (6a)$$

$$x(t) = E_0 |H(\omega)| \sin(\omega t + \arg(H(\omega))) \quad (6b)$$

dove

$$H(\omega) = \frac{1}{\alpha + j\omega\beta - \omega^2\gamma - j\omega^3\delta} \quad (7)$$

mentre la risposta alla sinusoide in transitorio, cioè alla eccitazione

$$e(t) = E_0 \sin(\omega t) u(t) \quad (8)$$

dove  $u(t)$  è la funzione gradino, si dimostra essere ([5]) la seguente:

$$x(t) = E_0 \left( A(e^{at} - k_1 \sin(\omega t + \varphi_1)) + B(\sin(\omega t + \varphi_2) - e^{\&t} \sin(ct + \varphi_2)) + C(\sin(\omega t + \varphi_3) + e^{\&t} \sin(ct + \varphi_3)) \right) \quad (9)$$

dove  $A, B, C, k_1, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , sono delle costanti caratteristiche del sistema ([5]), mentre  $\alpha, \& + jc, \& - jc$ , sono i poli della funzione di trasferimento  $H(s)$ , corrispondenti agli zeri del polinomio al denominatore della (3), ponendo  $j\omega = s$ . La parte immaginaria dei poli complessi,  $c$ , corrisponde alla pulsazione di risonanza  $\omega_s = 2\pi f_s$ .

### 1.3 Cause di non linearità

Si è visto, seppur in modo sommario, la conformazione dell'altoparlante e delle ipotesi che bisogna seguire per ammettere la linearità del funzionamento.

In realtà questo non è vero per la seguente serie di motivi:

- 1) il campo magnetico rimane distribuito uniformemente solo all'interno dell'intraferro: se la bobina esce dall'intraferro, molte sue spire vengono sottoposte all'azione di un campo magnetico molto attenuato;
- 2) l'elasticità delle sospensioni subisce variazioni sensibili sia, ma in piccola parte, per invecchiamento che per sforzi ingenti ed allungamenti, dovuti a segnali molto intensi, che plasticizzano il materiale;
- 3) la rigidità della membrana radiante non è perfetta, anzi dipende dalla frequenza del segnale emesso e dalla sua intensità: la prima genera il fenomeno di break-up, con disallineamenti di fase del suono emesso dalle varie

porzioni di membrana, mentre la seconda provoca delle deformazioni strutturali che fanno decadere l'ipotesi del funzionamento a disco rigido.

- 4) l'induttanza della bobina dipende dalla posizione della stessa: infatti se alcune spire della bobina escono dal traferro, esse vanno soggette ad una diversa permeabilità magnetica, quindi ad un valore diverso di induttanza.

Sicuramente lo spostamento è la causa preponderante di non linearità, perché è solo attraverso esso che la bobina si viene a trovare in zone dello spazio nelle quali la distribuzione di campo magnetico non è omogenea oppure la membrana tende a deformarsi e le sospensioni a plasticizzare.

Lo spostamento dipende in modo diretto dal parametro elettrico tensione, ma anche dalla frequenza, come si può dedurre dalla (6) e seguenti. Si può dimostrare [5] che esiste una frequenza, a parità di tensione elettrica applicata, per la quale lo spostamento  $x(t)$  ammette un massimo: tale frequenza è detta "frequenza di risonanza",  $f_s$ .

A questa frequenza, anche per modesti valori di potenza irradiata, lo spostamento che l'equipaggio mobile subisce può essere tale per cui l'altoparlante entri in distorsione, inficiando la validità della equazione (9). Se la potenza del segnale è molto alta può addirittura succedere il fenomeno di "clipping", che consiste in una sorta di "tosatura" del segnale, che si identifica in un suono detto "clap" (parola onomatopeica che rende l'idea del suono in questione, rassomigliante ad un battito di mani): questo succede quando l'equipaggio mobile va a sbattere violentemente contro il supporto fisso oppure, ed è più frequente, le sospensioni sono talmente stirate da provocare un suo repentino arresto.

Possiamo quindi affermare che l'ipotesi del funzionamento lineare è valida per segnali non molto intensi e con spettro di frequenza al di sotto della frequenza di break-up.

### 1.4 Interpretazione matematica delle non linearità

Una volta analizzate le cause che producono distorsione, è indispensabile fornire una trattazione matematica delle implicazioni che esse comportano nella riproduzione del suono.

La non uniforme distribuzione del campo magnetico può essere interpretata come una funzione dello spostamento  $x$ , così come per la rigidità delle sospensioni e la stessa induttanza elettrica. Possiamo allora scrivere le seguenti uguaglianze funzionali:

$$B \cdot l = F_1(x); \quad L_c = F_2(x); \quad C_{eq} = F_3(x) \quad (10)$$

le quali sono espandibili in serie di Taylor, fornendo le seguenti ed ulteriori uguaglianze

$$F_1(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots$$

$$\text{con } a_n = \frac{1}{n!} \left( \frac{\partial^n F_1(x)}{\partial x^n} \right)_{x=0} \quad (11a)$$

$$F_2(x) = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \dots$$

$$\text{con } b_n = \frac{1}{n!} \left( \frac{\partial^n F_2(x)}{\partial x^n} \right)_{x=0} \quad (11b)$$

$$F_3(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \dots$$

$$\text{con } c_n = \frac{1}{n!} \left( \frac{\partial^n F_3(x)}{\partial x^n} \right)_{x=0} \quad (11c)$$

Il problema che si pone è la determinazione di questi coefficienti. Per quelli di ordine zero la soluzione è immediata, perché sono determinati per via sperimentale mediante le misure statiche ([3], [4]).

Per quelli di ordine superiore si è proceduto per approssimazioni successive, utilizzando un apposito programma di simulazione su calcolatore ([5]).

### 1.5 Stesura del programma di simulazione

Il programma di simulazione implementa, nel dominio del tempo, l'equazione (9); in caso di risposta lineare le costanti caratteristiche ed i poli della funzione di trasferimento vengono mantenuti costanti; nel caso di risposta non lineare, esse vengono via via ricalcolate nel corso della simulazione, in base alle espressioni (11a), (11b), (11c) ed al valore assunto all'istante precedente, mantenendo così il legame causa-effetto.

La simulazione viene eseguita per un tempo pari a 64 millisecondi, a partire dall'attacco, dividendo l'intervallo in 4096 punti, avendo così una risoluzione pari a .015625 millisecondi.

Tale tempo è suggerito da più prove sperimentali eseguite su diversi campioni: si è visto che il tempo di assestamento è sempre compreso in questo intervallo.

I coefficienti richiesti per le non linearità arrivano sino al terzo ordine, potendosi introdurre dei coefficienti aggiuntivi per l'effetto di "clipping".

## 2. Applicazione allo studio di un altoparlante con freno elettrodinamico

Si è constatato che la causa dominante di funzionamento non lineare è una escursione troppo

ampia dell'equipaggio mobile: è chiaro che un controllo di quest'ultima non può che portare benefici alla risposta in frequenza ed alla durata dell'intero altoparlante.

Per controllo di escursione si intende quella metodologia atta a far sì che lo spostamento non oltrepassi un determinato valore e che la legge del moto sia il più possibile continua e graduale.

Finché l'altoparlante risponde all'eccitazione in modo proporzionale, cioè linearmente, l'escursione è autocontrollata dal sistema e quindi non c'è bisogno di intervento alcuno.

L'intervento diviene invece indispensabile qualora il segnale all'ingresso è così intenso da fare uscire dal controllo l'escursione, e quindi il suono emesso è palesemente distorto.

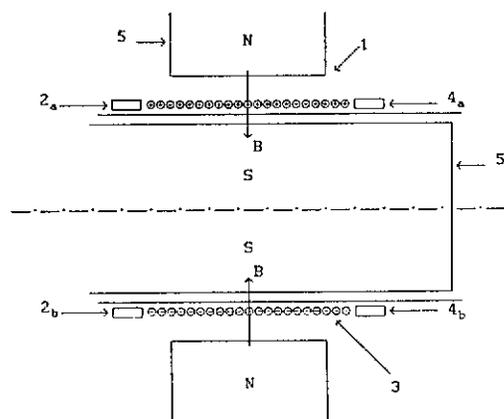
Questo intervento può essere di due tipi:

- attenuante il segnale all'ingresso, o intervento esterno
- attenuante la forza motrice, o intervento interno

### 2.1 Freno elettrodinamico

L'azienda R.C.F. - S.p.A. ha brevettato già da alcuni anni un dispositivo detto per l'appunto freno elettrodinamico.

Nelle sue parti essenziali questo sistema è costituito da una bobina ad un unico conduttore che viene avvolta assieme alla bobina principale, come è illustrato in fig.3



- |                  |   |
|------------------|---|
| 1                | traferro  |
| 2 <sub>a,b</sub> | sezione della prima spira del freno elettrodinamico   |
| 3                | sezione della bobina principale                       |
| 4 <sub>a,b</sub> | sezione della seconda spira del freno elettrodinamico |
| 5                | circuito magnetico                                    |
| B                | induzione magnetica                                   |

Fig. 3 - "Freno Elettrodinamico" secondo brevetto originale R.C.F.

L'azione frenante che svolge questo dispositivo è dovuta alla interazione tra il campo magnetico fisso e quello generato dalla bobina ausiliaria stessa, chiusa in corto circuito, nel rispetto della legge di Faraday e



con

$$R'_e = \frac{R_e (R_e + R_{aux})}{2 R_e + R_{aux}} \quad (13)$$

$$L'_e = L_e \left( 1 - 2 \frac{R_e (R_e + R_{aux})}{(2 R_e + R_{aux})^2} \right) \quad (14)$$

$$e'(t) = e(t) \frac{R_{aux}}{2 R_e + R_{aux}} \quad (15)$$

Vengono qui riportati i risultati della simulazione numerica con  $E_0 = 10V$  (condizione di linearità) e a  $E_0 = 50V$  (condizione di massima distorsione), riferite ad un altoparlante, preso come prototipo, fornito dalla R.C.F..

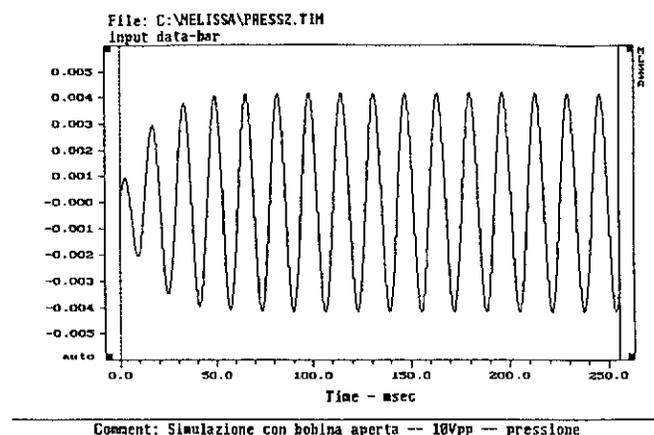
I primi 2 (figg. 8 e 9) si riferiscono all'altoparlante

con freno elettrodinamico non inserito, mentre i secondi (figg. 10 e 11) con freno elettrodinamico inserito, come riportato nelle didascalie.

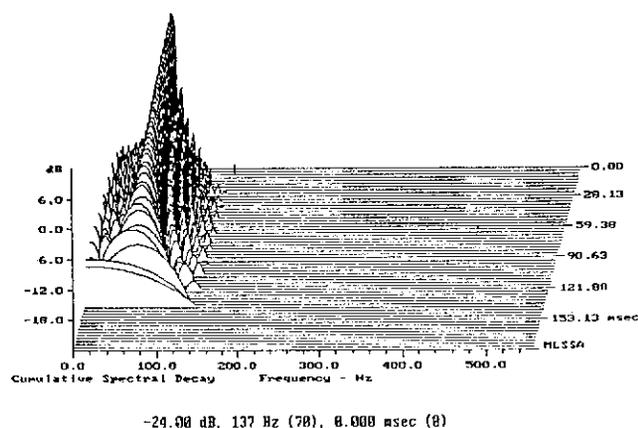
Dai risultati riportati notiamo che, aumentando la tensione di segnale, aumenta la distorsione della forma d'onda, fino ad avere degli evidenti frastagliamenti denunciati una forte non linearità e rimbalzi dell'equipaggio mobile.

Con l'intervento del freno otteniamo un sensibile miglioramento: infatti la forma d'onda è mantenuta pressoché invariata, mentre la relativa waterfall mostra un decisivo decremento delle armoniche spurie.

Una leggera perdita di efficienza è il prezzo che bisogna pagare per avere questi benefici, che comunque, sempre a livello di simulazione, rimane basso ed auspica un buon riscontro sperimentale, agendo opportunamente sul circuito esterno.



MLSSA: Time Domain

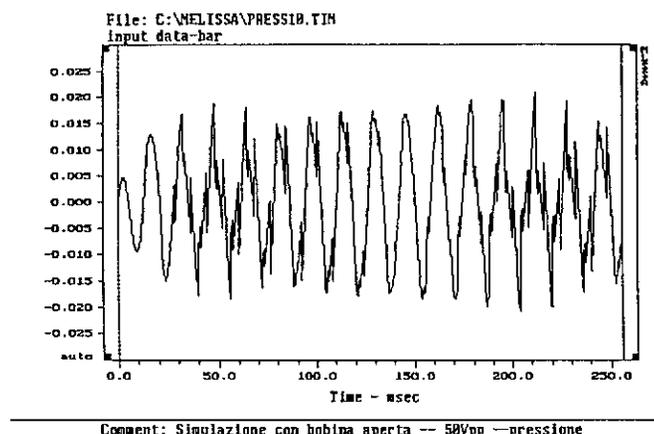


MLSSA: Waterfall

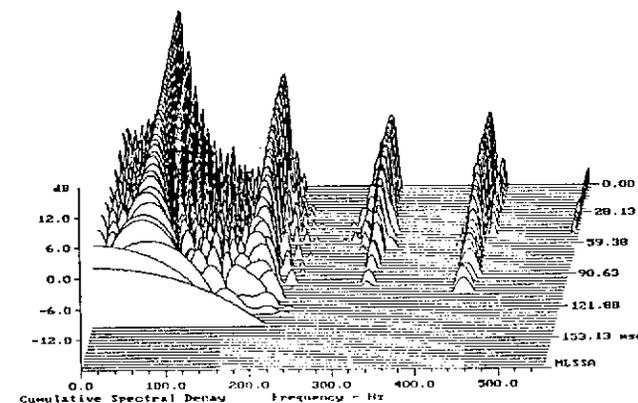
8-a

8-b

Fig. 8 - Simulazione numerica transitorio di attacco - freno disinserito - tensione = 10 V: a) risposta temporale. b) Waterfall.



MLSSA: Time Domain

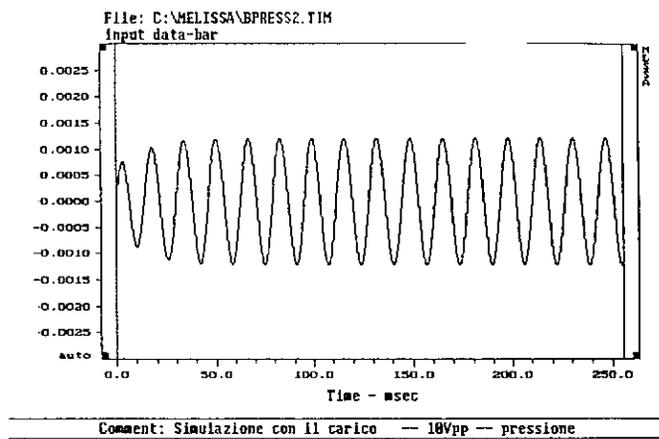


MLSSA: Time Domain

9-a

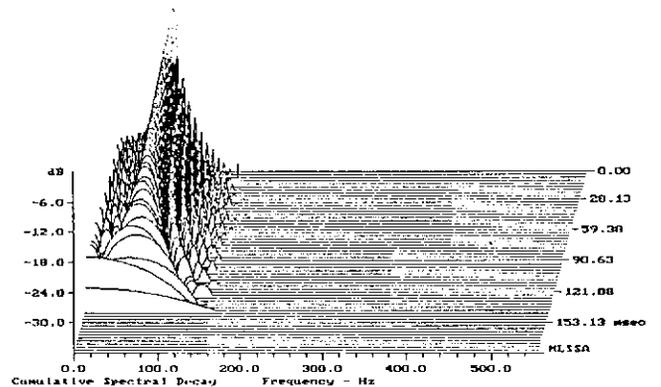
9-b

Fig. 9 - Simulazione numerica transitorio di attacco - freno disinserito - tensione = 50 V; a) risposta temporale, b) Waterfall.



MLSSA: Time Domain

10-a

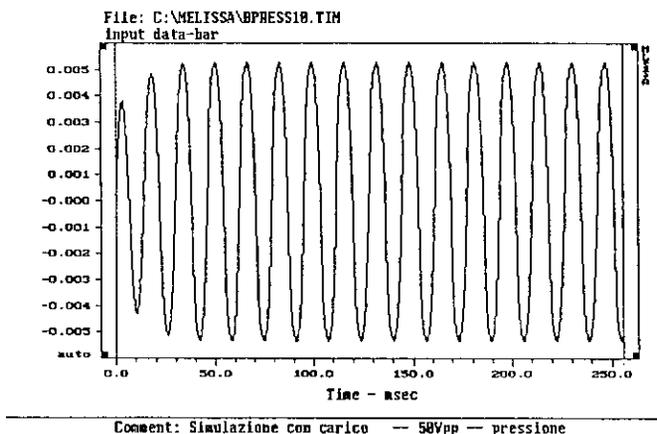


-36.00 dB, 137 Hz (70), 0.000 msec (0)

MLSSA: Waterfall

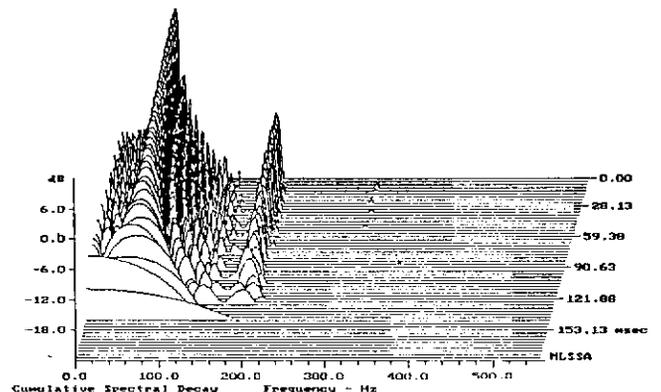
10-b

Fig. 10 - Simulazione numerica transitorio di attacco - freno inserito - tensione = 10 V; a) risposta temporale, b) Waterfall.



MLSSA: Time Domain

11-a



-24.00 dB, 137 Hz (70), 0.000 msec (0)

MLSSA: Waterfall

11-b

Fig. 11 - Simulazione numerica transitorio di attacco - freno inserito - tensione = 50 V; a) risposta temporale, b) Waterfall.

### 3. Verifiche sperimentali

#### 3.1 Strumentazione impiegata

Per la verifica sperimentale si è impiegato un sistema di misura che può essere riassunto con uno schema a blocchi illustrato nella fig. 12.

All'altoparlante viene inviato il segnale, un tono puro di frequenza pari alla  $f_g$ , costituito da degli intervalli di tempo, bursts, in cui esso è attivo; ciò per preservare l'altoparlante da eventuali danneggiamenti. La lunghezza temporale di ogni burst è tale per cui il transitorio di attacco è completamente estinto, mentre la distanza fra un burst ed il successivo è tale per cui il transitorio di stacco è completamente estinto. Il livello del segnale, cioè la tensione, viene variato

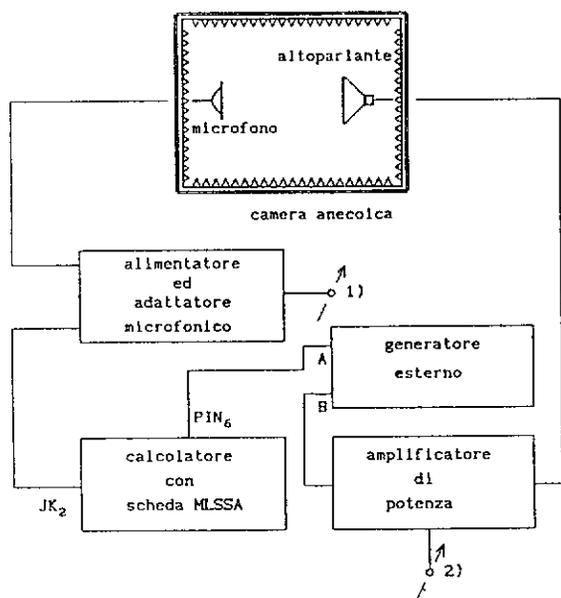
direttamente sull'amplificatore di potenza e letto mediante un voltmetro a valore massimo.

Il microfono raccoglie il suono irradiato dall'altoparlante, sottoforma di variazioni di pressione, e lo trasforma di nuovo in segnale elettrico, linearmente.

Questo segnale viene poi adattato all'ingresso del MLSSA, per essere acquisito ed elaborato.

Dopo aver eseguito un certo numero di prove, predisponendo la frequenza del generatore pari alla frequenza di risonanza dell'altoparlante, si è constatato che il burst ottimale deve essere costituito da 11 periodi elementari dell'onda sinusoidale.

Nell'altoparlante preso come campione, gentilmente fornito dall'azienda R.C.F., si ha che la frequenza di risonanza è di circa 60Hz, quindi la lunghezza temporale del periodo elementare è di 16



- JK<sub>2</sub> connessione d'ingresso MLSSA
- PIN<sub>6</sub> piedino di acquisizione sincronismo MLSSA
- A uscita sincronismo generatore
- B uscita segnale generatore
- 1) regolazione attenuazione
- 2) regolazione intensità segnale o volume

Fig. 12 - Schema del sistema di misura impiegato.

millisecondi: la lunghezza del burst è pari a circa 180 millisecondi.

### 3.2 Risultati sperimentali

Si sono effettuate quindi le varie misure incrementando il valore massimo della tensione di segnale di 2V: con questo procedimento si parte comunque da 10V, dato che per valori inferiori non si hanno variazioni sensibili, se non di scala per effetto dell'aumento della tensione.

Dalle varie misure eseguite, che costituiscono una mole non indifferente di grafici, riportiamo solo quelle più significative che danno un'immagine complessiva del problema sufficientemente comprensibile.

Esse corrispondono ad una misura iniziale, eseguita a  $E_0 = 10V$ , che può prendersi come base di riscontro per le successive misure, essendo questa la condizione di non distorsione (fig. 13), da una successiva, eseguita a  $E_0 = 30V$ , ove iniziano a farsi robuste le non linearità (fig. 14), e da una terza eseguita a  $E_0 = 50V$ , dove la distorsione raggiunge valori estremamente elevati (fig. 15).

### 3.3 Discussione dei risultati

Possiamo osservare che man mano che la tensione aumenta, aumenta la distorsione: si può

vedere ciò osservando la forma d'onda temporale e il diagramma waterfall, che denuncia un aumento progressivo sia dell'intensità delle armoniche che un aumento anche del numero di queste.

In fase di attacco si ha, per tensioni superiori ai 30V, un progressivo aumento delle armoniche, soprattutto quelle di ordine pari, e la waterfall denuncia un allargamento del campo delle frequenze: ciò si può interpretare come un adattamento che il sistema deve subire per adeguarsi al segnale molto intenso inviato dall'amplificatore.

Se il segnale è troppo intenso, e ciò succede dai 40V in poi, l'altoparlante non riesce ad adeguarsi al segnale e l'equipaggio mobile inizia a seguire un moto assai discontinuo, costituito da dei veri e propri rimbalzi da una posizione massima all'altra: lo si può rilevare dalla forma d'onda del segnale emesso e dalla sua waterfall.

Notiamo infatti dei picchi pronunciati, quasi a cuspidi, nella prima, raggiunti in modo alquanto irregolare: le waterfall denunciano il fatto con un enorme incremento delle armoniche, sia pari che dispari ed una sorta di indistinguibilità tra il transitorio, o attacco, e il funzionamento a regime.

Siamo nelle condizioni di grandi non linearità: le sospensioni sono molto stirate ed escono sensibilmente dal funzionamento lineare, la bobina si viene a trovare in zone dello spazio in cui il campo magnetico è praticamente inesistente.

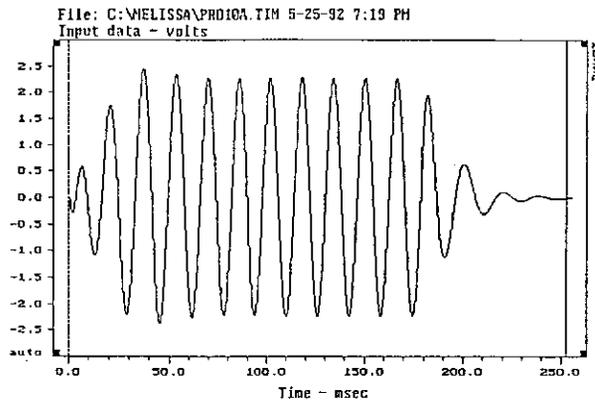
Una prova indiscutibile dell'aumento repentino della distorsione, può essere data misurando la distorsione relativa alla prima parte del segnale emesso, ad esempio misurando la distorsione relativa ai primi sei periodi.

La prima famiglia di prove sperimentali, come si è facilmente dedotto, riguarda l'altoparlante con freno elettrodinamico non inserito, con la dicitura "bobina aperta".

Con il freno elettrodinamico inserito, e con esso il carico esterno, si viene a costituire la seconda famiglia di prove sperimentali (figg. 16, 17 e 18): si evidenzia come la simulazione abbia efficacemente ed esattamente interpretato la sua funzione.

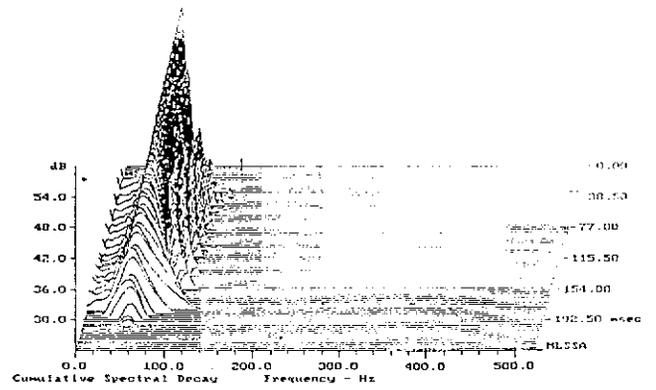
Naturalmente la predisposizione della misura rimane invariata: i risultati sono esposti nei grafici che seguono, riportando nel fondo la dicitura "circ. aux."

Il risultato conseguito è notevole: infatti la forma d'onda è preservata anche ad alti valori di  $E_0$ , si ha la quasi totale scomparsa di rimbalzi e di discontinuità sul segnale irradiato; le waterfall sostengono decisamente tali affermazioni dimostrando un confinamento energetico alla frequenza di risonanza, quindi una distorsione totale molto ridotta.



NLSSA: Time Domain

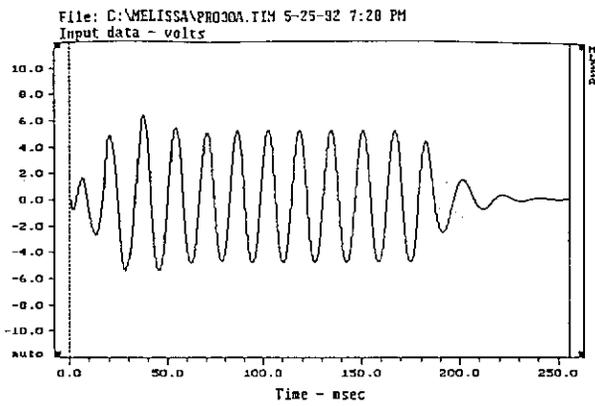
13-a



NLSSA: Time Domain

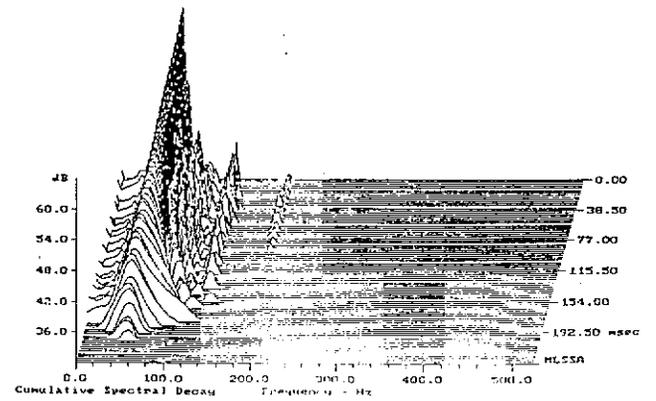
13-b

Fig. 13 - Misura sperimentale transitorio di attacco - freno disinserito - tensione = 10 V; a) risposta temporale, b) Waterfall.



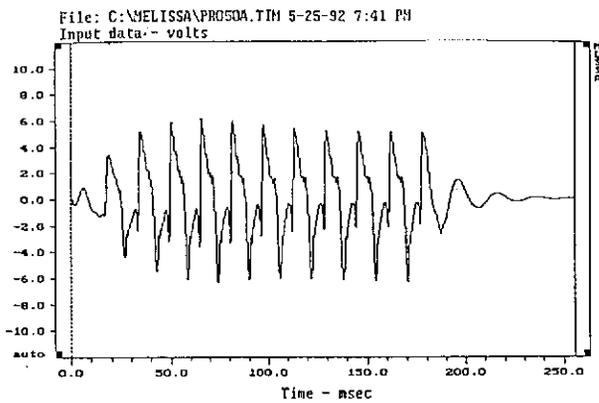
NLSSA: Time Domain

14-a



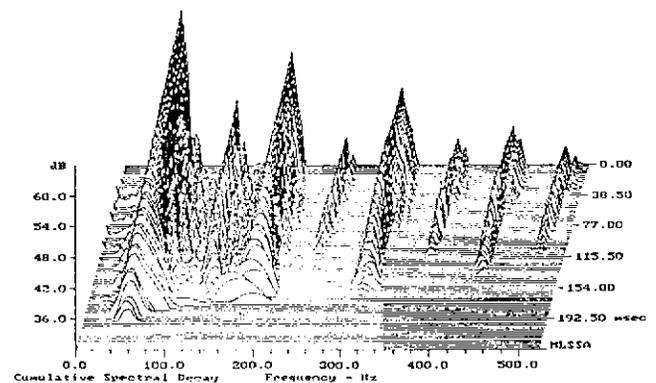
14-b

Fig. 14 - Misura sperimentale transitorio di attacco - freno disinserito - tensione = 30 V; a) risposta temporale, b) Waterfall.



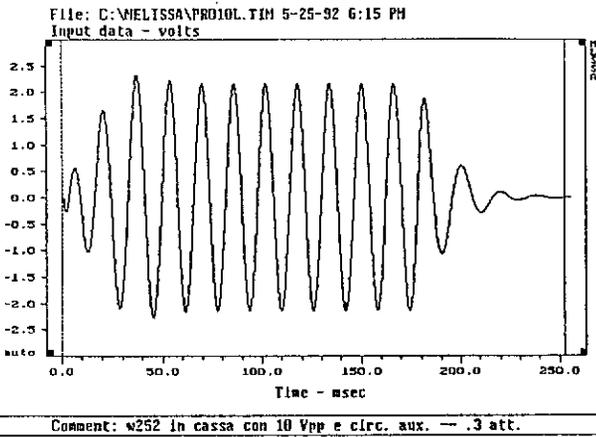
NLSSA: Time Domain

15-a

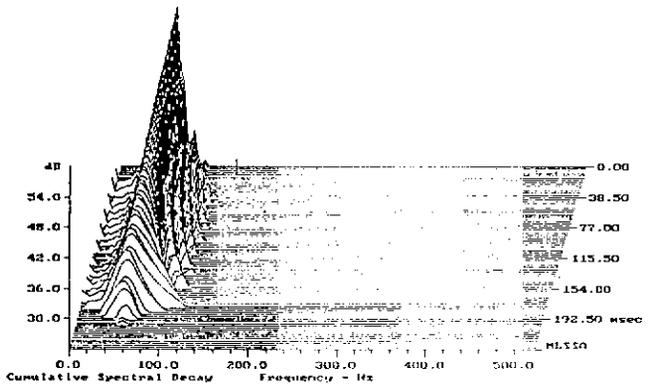


15-b

Fig. 15 - Misura sperimentale transitorio di attacco - freno disinserito - tensione = 50 V; a) risposta temporale, b) Waterfall.



MLSSA: Time Domain



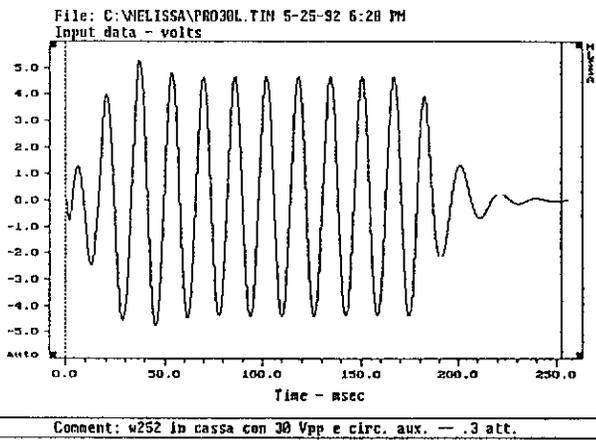
29.00 dB, 129 Hz (33), 0.000 msec (0)

MLSSA: Waterfall

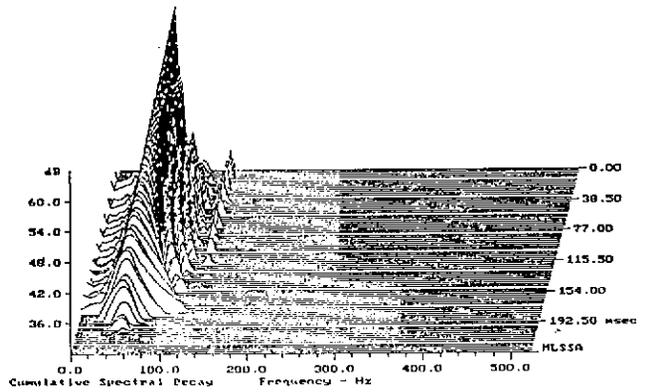
16-a

16-b

Fig. 16 - Misura sperimentale transitorio di attacco - freno inserito - tensione = 10 V; a) risposta temporale, b) Waterfall.



MLSSA: Time Domain



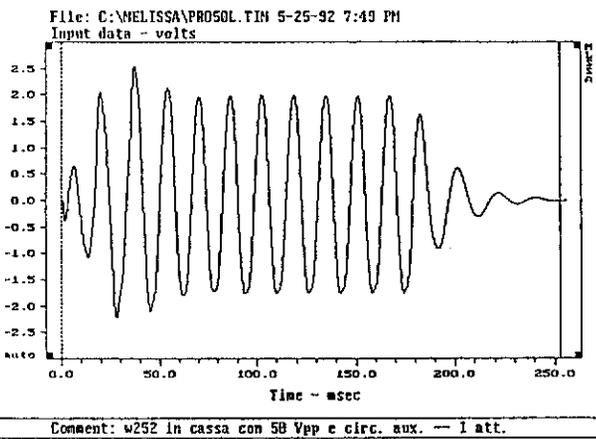
30.00 dB, 129 Hz (33), 0.000 msec (0)

MLSSA: Waterfall

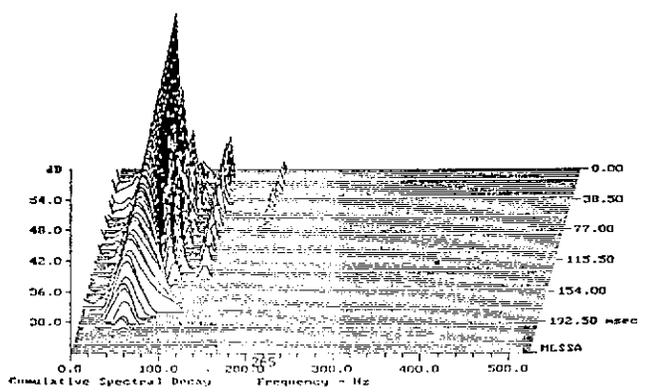
17-a

17-b

Fig. 17 - Misura sperimentale transitorio di attacco - freno inserito - tensione = 30 V; a) risposta temporale, b) Waterfall.



MLSSA: Time Domain



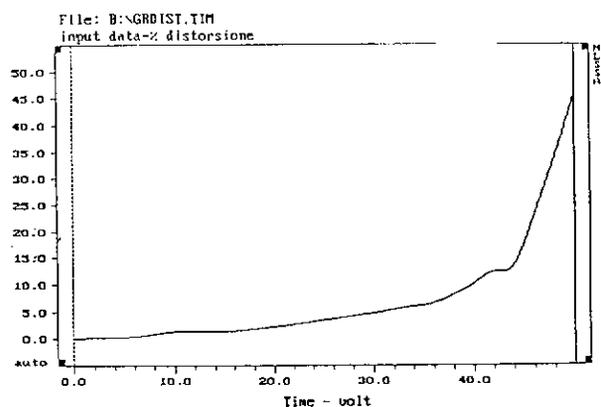
24.00 dB, 129 Hz (33), 0.000 msec (0)

MLSSA: Waterfall

18-a

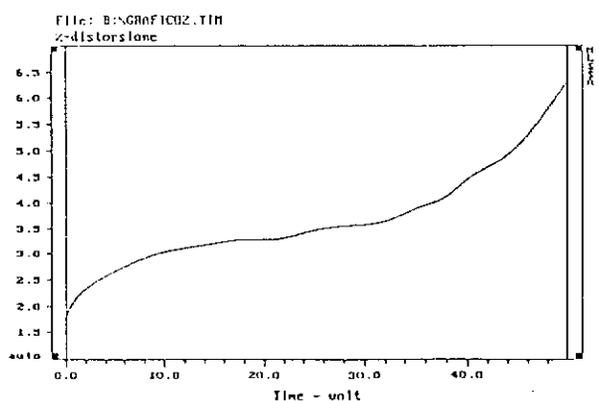
18-b

Fig. 18 - Misura sperimentale transitorio di attacco - freno inserito - tensione = 50 V; a) risposta temporale, b) Waterfall.



MLSSA: Time Domain

Fig. 19 - Grafico Distorsione / Tensione di alimentazione - senza freno elettrodinamico.



MLSSA: Time Domain

Fig. 20 - Grafico Distorsione / Tensione di alimentazione - con freno elettrodinamico inserito.

#### 4. Conclusioni

La sperimentazione eseguita ha posto in evidenza la correttezza delle previsioni teoriche circa la possibilità di controllare la distorsione di un altoparlante mediante un apposito sistema frenante, detto "freno elettrodinamico"

Questo freno elettrodinamico è costituito da un circuito elettrico esterno "intelligente", cioè in grado di intervenire qualora le condizioni di funzionamento lo rendano necessario, e da una bobina, ad esso opportunamente collegata, che ha le stesse caratteristiche della bobina che produce il moto.

Da tutte le misure effettuate, in special modo dal grafico rappresentante la distorsione in funzione dell'intensità del segnale applicato senza e con freno elettrodinamico (figg. 19 e 20), si può dedurre un abbattimento sostanziale della distorsione globale che può arrivare, soprattutto per intensità elevate, persino all'80%.

Le prove effettuate in camera di ascolto hanno poi confortato ulteriormente lo studio intrapreso, denotando una decisiva "ripresa" sonora dell'altoparlante ed una sua estensione lineare anche ai segnali molto intensi

Il sistema di frenatura realizzato è così di applicazione immediata laddove gli altoparlanti sono

costretti a lavorare in condizioni molto gravose, al limite delle loro prestazioni, preservandone l'integrità e la durata nel tempo.

#### Bibliografia

- [1] Beranek L.L., *Acoustics*, McGraw-Hill, 1954.
- [2] Kinsler L.E., Frey A.R., *Fundamentals of acoustics*, J. Wiley - 2<sup>a</sup> ed. 1962 e 3<sup>a</sup> ed. 1982.
- [3] Small R.H., *Direct radiator loudspeaker system analysis*, J.A. E. S., 1972.
- [4] Small R.H., *Closed box loudspeaker systems*, J.A.E.S., 1973.
- [5] Ugolotti E., *Studio di un modello fisico e matematico di un altoparlante con freno elettrodinamico*, Tesi di Laurea, Università degli studi di Parma, Facoltà di Ingegneri, 1992.
- [6] Klippel W., *Dynamic measurements and interpretation of the nonlinear parameters of electrodynamic loudspeakers*, J.A.E.S., 1990.
- [7] Kaizer A.J.M., *Modeling of the non linear response of an electrodynamic loudspeaker by a Volterra series expansion*, J.A.E.S., 1987.