

L'altoparlante reale

“La pienezza come estrema felicità è possibile soltanto negli istanti in cui si prende coscienza profondamente dell'irrealtà sia della vita sia della morte”

Emil Cioran

In questo capitolo verranno mostrate le limitazioni tipiche degli altoparlanti elettrodinamici. Per piccoli segnali il modello di Thiele Small dà una buona rappresentazione dell'effettivo funzionamento dell'altoparlante, ma questa semplificazione perde validità nel reale utilizzo dei trasduttori. Molti parametri che nel modello erano considerati costanti verranno resi variabili funzioni dello spostamento della bobina mobile o della corrente circolante, verrà mostrato il comportamento della membrana alle frequenze in cui non è più valida la similitudine col pistone rigido, infine verranno analizzati i limiti di potenza elettrica gestibile dai trasduttori.

3.1 LA NECESSITÀ DI UN MODELLO PIÙ COMPLESSO

Il lavoro compiuto da Thiele e Small sulla modellizzazione degli altoparlanti è stato fondamentale per descriverne il comportamento a bassa frequenza. Nella loro struttura tutti i parametri fondamentali sono tenuti costanti, e questo è dovuto all'assunzione che l'altoparlante lavori con segnali talmente piccoli da non generare escursioni apprezzabili. Queste semplificazioni hanno permesso un efficace studio del funzionamento dell'altoparlante e del contenitore su cui è montato, hanno ridotto i parametri necessari alla descrizione dei trasduttori e semplificato la risoluzione numerica del modello. Purtroppo, però, la struttura perde di validità non appena all'altoparlante vengono applicati segnali di ampiezza maggiore.

Nel normale funzionamento qualsiasi altoparlante è soggetto a distorsioni non lineari, per conoscerne quindi più approfonditamente il comportamento bisogna affinare il modello introducendo i reali comportamenti dei parametri utilizzati.

Già nel passato diversi ricercatori analizzarono le variazioni di alcuni parametri in funzione della frequenza o dell'escursione, ma solo recentemente, con l'introduzione di nuove metodologie di misura e con il supporto di elaboratori sempre più potenti, è stato approfondito il campo delle non linearità. Sono stati proposti nuovi modelli più completi e complessi, i quali introducono alle non

linearità esplicitando le dipendenze di alcuni parametri all'escursione o alla corrente circolante nella bobina, W. Klippel è uno dei ricercatori che si dedica completamente a questo campo, a partire dai suoi primi articoli sulle origini e sulle possibili modellizzazioni delle non linearità [9]-[10], continua nella ricerca della correlazione tra cause ed effetti proponendo metodi di misura e modelli più accurati; è stato inoltre creato un modello termico più aderente alla realtà e tramite nuove misure e strumenti di simulazione è ora possibile osservare il comportamento della membrana al di fuori della regione di comportamento a pistone rigido.

3.2 PARAMETRI VARIABILI CON L'ESCURSIONE

L'equipaggio mobile è costituito dalla bobina, dal suo supporto, dalla membrana e dalle sospensioni interna ed esterna; è vincolato in modo tale da poter solo traslare perpendicolarmente alle linee di flusso magnetico nel traferro. Si definisce escursione positiva l'allontanamento del cono dal complesso magnetico, escursione negativa l'avvicinamento. Se non viene fornito nessuno stimolo esterno l'equipaggio mobile si trova in posizione di riposo, con la bobina generalmente centrata rispetto al traferro e le sospensioni libere di compiere escursioni in entrambi i versi di traslazione.

Durante il funzionamento la posizione reciproca di bobina e traferro mutua continuamente, e le sospensioni adattano la loro forma allo spostamento; questi cambiamenti sono causa di variazioni nelle caratteristiche fisiche e meccaniche dell'altoparlante.

3.2.1 IL FATTORE DI FORZA

Parametro fondamentale tra le caratteristiche degli altoparlanti magnetodinamici, il fattore di forza governa la trasduzione da energia elettrica e meccanica.

La forza che insiste sull'equipaggio mobile è tradizionalmente indicata mediante l'espressione $F = B \cdot l \cdot i$, forza perpendicolare alle linee di flusso magnetico e alla direzione della corrente circolante nella bobina. Purtroppo il prodotto $B \cdot l$ non è costante al variare della posizione reciproca tra bobina e complesso magnetico per vari motivi: all'interno del traferro può essere corretto ritenere costante il campo magnetico B sulla traiettoria della bobina, ma il campo marginale, la distribuzione del campo nell'intorno del traferro, è tutt'altro che costante o simmetrico. Mediante una simulazione agli elementi finiti è possibile vedere l'andamento delle linee di forza su una sezione del motore di un altoparlante (simulazioni effettuate con il software Femm, programma freeware realizzato da David Meeker, venduto poi alla Foster-Miller).

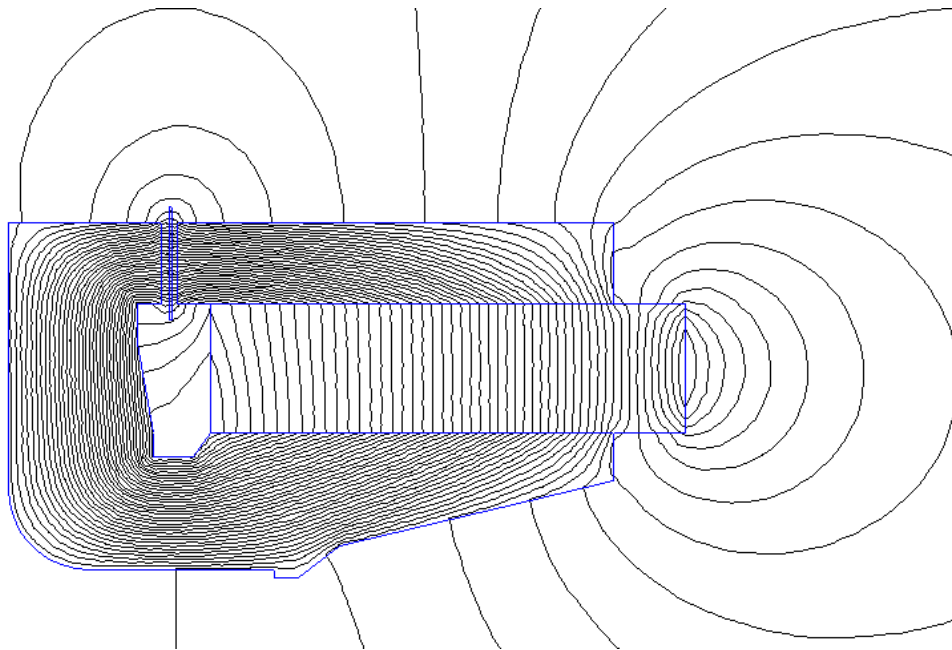


Fig. 3.1: linee di forza nella sezione di un motore elettromagnetico

Concentrando l'attenzione sul traferro e le zone adiacenti è interessante osservare l'intensità del campo magnetico, campo sul quale le spire della bobina si concateneranno per generare la forza vibromotrice.

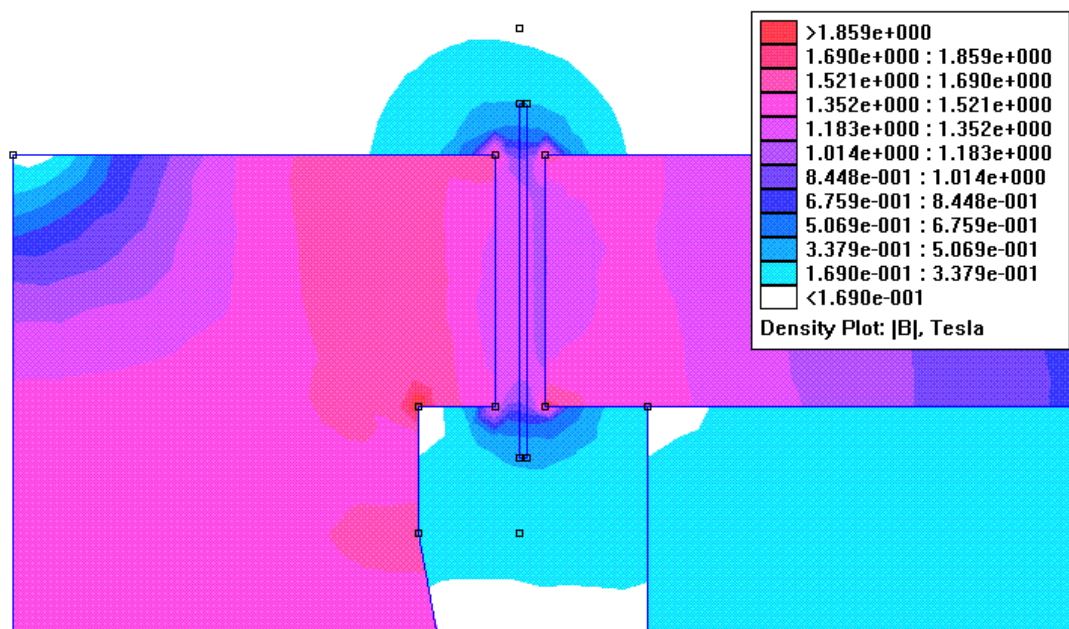


Fig. 3.2: intensità di campo magnetico nell'intorno del traferro

Sempre attraverso i risultati della simulazione è possibile mettere su grafico l'andamento del modulo dell'intensità del campo magnetico sul percorso della bobina mobile, in modo da notare subito eventuali asimmetrie.

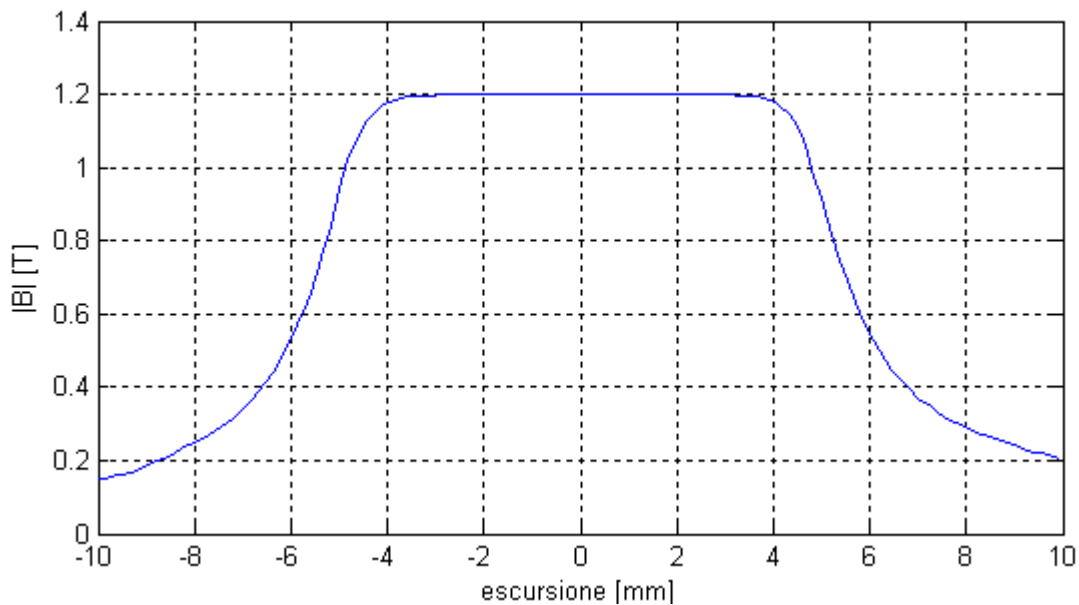


Fig. 3.3: andamento del modulo di B con l'escursione

L'esempio trattato è un buon complesso magnetico che attua delle miglorie per simmetrizzare l'andamento del campo, come si può infatti vedere dalla figura 3.3 il comportamento alle escursioni positive o negative è molto simile.

Integrando il risultato precedente sulla lunghezza della bobina è possibile ottenere l'andamento del parametro $B \cdot l$, fondamentale per l'analisi e la simulazione del comportamento dell'altoparlante reale. Recentemente sono stati realizzati strumenti di misura che permettono di ricavare l'andamento di $Bl(x)$, la figura 3.4 è l'output grafico del software di W. Klippel [11].

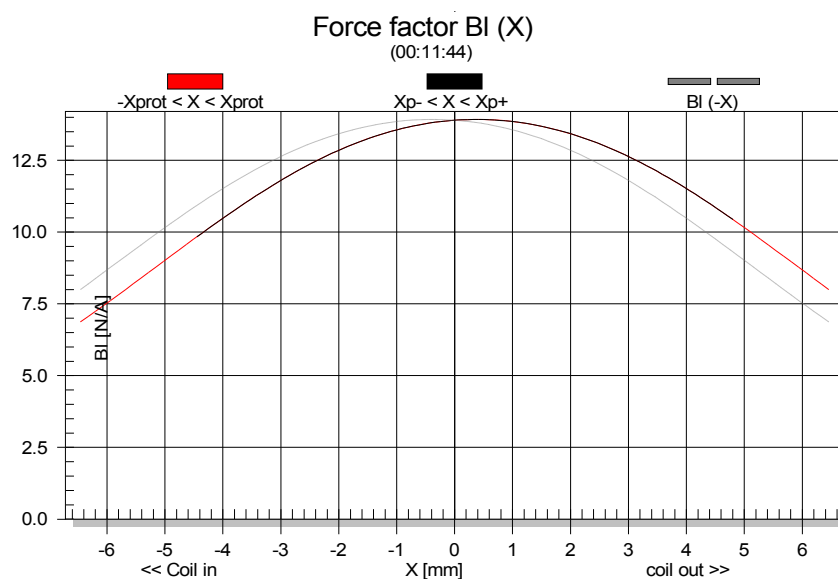


Fig. 3.4: misura della dipendenza di Bl con l'escursione

L'equazione che governa la forza agente sulla membrana diventa $F = Bl(x) \cdot i$, mentre la corrente è ricavabile dall'equazione $(R_e + R_g) \cdot i + L_e \cdot di/dt = E_g - Bl(x) \cdot dx/dt$. Mediante queste equazioni e introducendo un semplice circuito meccanico costituito dalla massa M_{ms} , dalla cedevolezza C_{ms} e dalla resistenza R_{ms} , è possibile costruire un modello matematico che simuli la non linearità del fattore di forza. Nella fig. 3.5 è rappresentato il modello costruito con Simulink, pacchetto di simulazione della The MathWorks; esso tiene conto esclusivamente della non linearità del fattore di forza con l'escursione, introdotta mediante una look-up table. Uno strumento di questo genere permette la previsione del comportamento e delle distorsioni dell'altoparlante isolandone una sola causa, consentendo l'analisi di diverse strutture e geometrie di circuito magnetico senza l'onere della prototipazione.

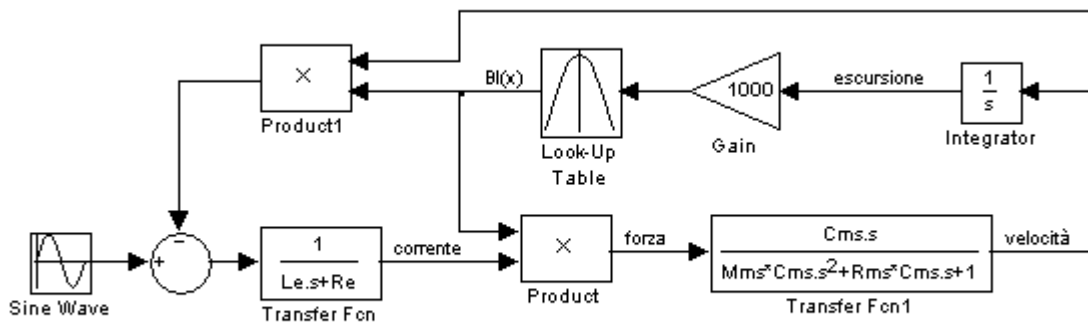


Fig. 3.5: modello elettromeccanico per la simulazione di $Bl(x)$

La struttura polare più semplice da realizzare ha il polo centrale di forma cilindrica, ma questa conformazione perde la simmetria dei fianchi della curva del $Bl(x)$; semplici accorgimenti come l'estensione del polo centrale oltre al traferro o la conformazione a T del polo centrale stesso (come mostrato nelle simulazioni FEM) permettono di migliorare notevolmente la linearità del complesso magnetico.

3.2.2 L'INDUTTANZA DELLA BOBINA MOBILE

La bobina mobile è costituita da un filo conduttore avvolto su un supporto cilindrico isolante ed è immersa nel campo magnetico statico generato dal magnete permanente; oltre ad essere caratterizzata dalla resistenza R_e nel modello più semplice è rappresentata anche dall'induttore L_e .

Nella traslazione dell'equipaggio mobile verso l'interno o l'esterno del complesso magnetico la bobina vede una maggiore o minore riluttanza, questa variazione modifica il flusso generato a parità di corrente e causa la variazione dell'induttanza equivalente.

L'andamento al variare dell'escursione può essere ancora simulato attraverso software fem o misurato attraverso opportuni sistemi di misura.

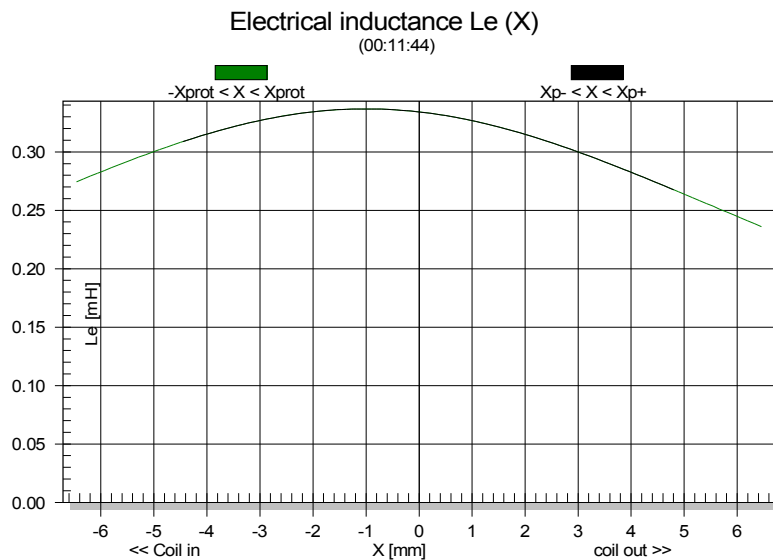


Fig. 3.6: misura della dipendenza di L_e con l'escursione

La figura 3.6 mostra l'andamento di $L_e(x)$ misurato su un altoparlante reale, si può notare la progressiva diminuzione dell'induttanza per escursioni positive, cioè quando la bobina tende a fuoriuscire dal complesso magnetico, mentre per le escursioni negative la diminuzione è inferiore.

Introducendo l'andamento non lineare misurato o simulato nell'equazione che governa la maglia elettrica del circuito equivalente:

$$v_{in} = R_e \cdot i + \frac{d}{dt}(L_e(x) \cdot i) + Bl \cdot dx/dt$$

è ancora possibile costruire un modello che tenga conto esclusivamente di questa non linearità per analizzare il comportamento e le distorsioni dell'altoparlante.

Come per la simulazione della non linearità del fattore di forza, nel modello è stato introdotto un semplice circuito meccanico costituito dalla massa mobile, dalla cedevolezza e dalla resistenza meccanica delle sospensioni governato dalla seguente equazione:

$$F = R_{ms} \cdot dx/dt + M_{ms} \cdot d^2x/dt^2 + x/C_{ms}$$

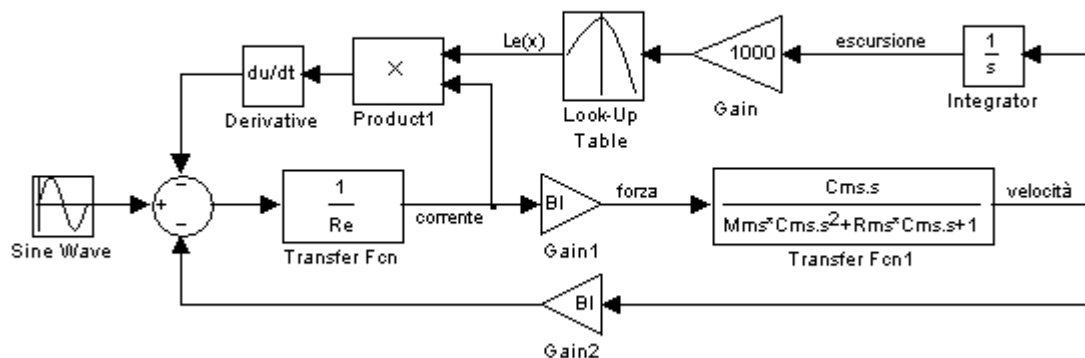


Fig. 3.7: modello elettromeccanico per la simulazione di $Le(x)$

La variazione dell'induttanza con lo spostamento è poco dannosa a bassa frequenza, dove comunque la reattanza è inferiore alla resistenza, ma è causa di elevata distorsione in quegli altoparlanti cosiddetti a larga banda, dove la corrente delle medio - alte frequenze viene modulata dallo spostamento generato dalla riproduzione delle basse frequenze. Si ha quindi una elevata distorsione di intermodulazione che va a inficiare la corretta riproduzione delle frequenze superiori.

Per ovviare a questo comportamento la soluzione più utilizzata è quella di ricoprire il polo centrale con un cappuccio di materiale ad alta conducibilità elettrica, come il rame o l'alluminio, in questo modo le correnti indotte nel conduttore creano un flusso opposto a quello generato dalla bobina diminuendo sostanzialmente il valore dell'induttanza e l'effetto della sua variazione.

In alternativa al cappuccio può essere posto un anello di materiale conduttore nel traferro, avente quindi un comportamento simile. Lo svantaggio di queste soluzioni è l'aumento del traferro, con la conseguente diminuzione del campo magnetico al suo interno.

3.2.3 LA CEDEVOLEZZA DELLE SOSPENSIONI

La sospensione esterna e lo spider determinano la forza meccanica di ritorno del complesso mobile verso la posizione di riposo. Sotto la frequenza di risonanza dell'altoparlante il moto della membrana è controllato prevalentemente dalla cedevolezza delle sospensioni, quindi una elevata linearità sarebbe auspicabile.

Ma anche le sospensioni devono sottostare a compromessi: la linearità spesso è trascurata a favore di una buona stabilità nel tempo e dalla necessità di avere un ottimo centraggio della bobina all'interno del traferro.

L'analisi del comportamento della cedevolezza con l'escursione può essere effettuata tramite simulazioni ad elementi finiti (nelle quali la caratterizzazione dei materiali e delle geometrie ricopre un ruolo fondamentale) o misure sull'altoparlante finito tramite opportuni strumenti.

La cedevolezza totale delle sospensioni è data dalla composizione della cedevolezza dello spider $C_s(x)$ e di quella della sospensione esterna $C_e(x)$:

$$C_{ms}(x) = \left(\frac{1}{C_s(x)} + \frac{1}{C_e(x)} \right)^{-1}.$$

Nella figura 3.8 è riportata la misura dell'andamento di $C_{ms}(x)$ effettuata su un altoparlante reale.

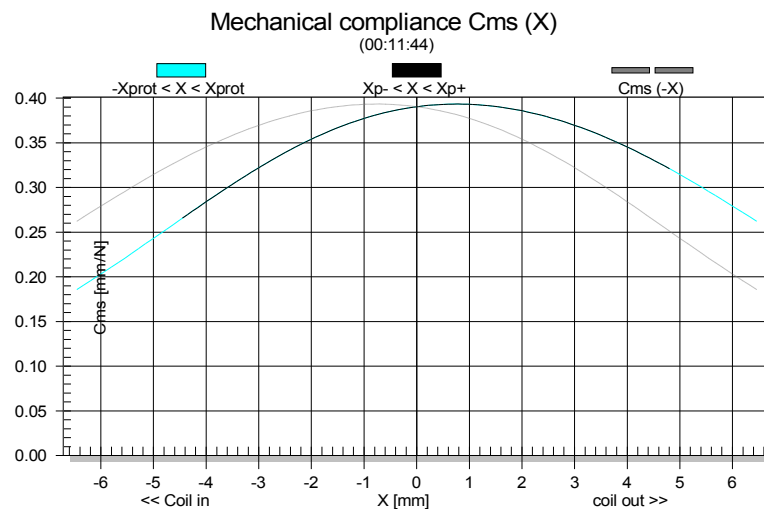


Fig. 3.8: misura dell'andamento di $C_{ms}(x)$

Allontanandosi dalla posizione di riposo lo stiramento delle sospensioni crea una diminuzione nella cedevolezza, pur essendo un comportamento non lineare e causa di distorsioni ha il vantaggio di rappresentare una protezione contro le sovraescursioni che potrebbero danneggiare l'altoparlante.

Partendo dall'andamento di $C_{ms}(x)$, e inserendolo nell'equazione che governa il circuito meccanico dell'altoparlante:

$$F = R_{ms} \cdot dx/dt + M_{ms} \cdot d^2x/dt^2 + x/C_{ms}(x)$$

è possibile costruire un modello capace di simulare il moto della membrana e le sue distorsioni.

La figura 3.9 mostra la struttura creata in Simulink in grado di prevedere tutte le grandezze elettriche e meccaniche legate alla vibrazione della membrana.

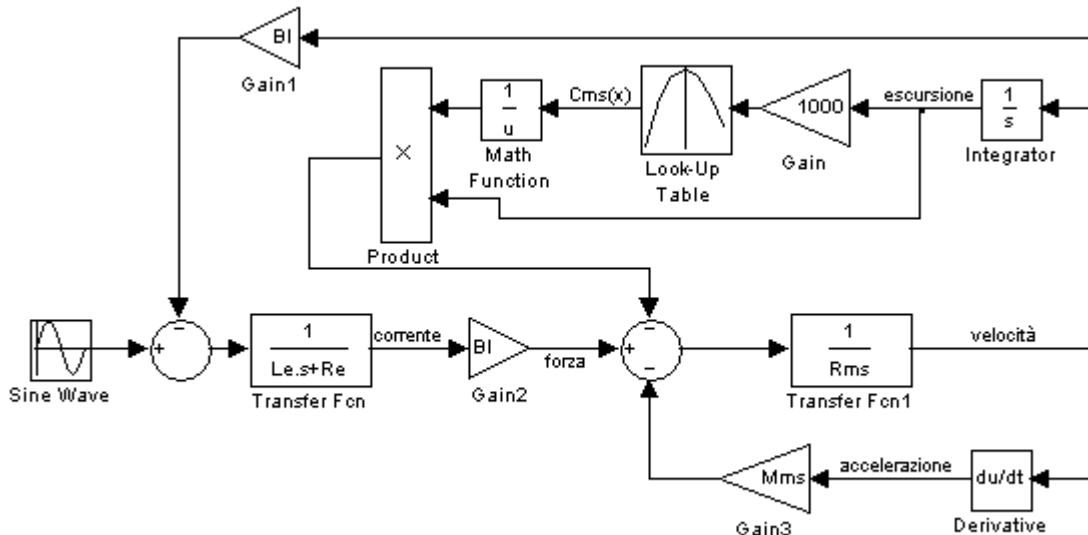


Fig. 3.9: modello elettromeccanico per la simulazione di $C_{ms}(x)$

L'unico metodo valido per la diminuzione delle distorsioni associate a $C_{ms}(x)$ è lo studio di nuove geometrie e materiali che consentano non solo l'adeguata stabilità nel tempo e il necessario centraggio, ma anche un andamento più costante della cedevolezza.

3.3 PARAMETRI VARIABILI CON LA CORRENTE

Durante il funzionamento dell'altoparlante la bobina mobile è percorsa da una corrente i che determina la forza applicata alla membrana; essendo costruito da materiali non ideali il circuito magnetico risente del flusso generato da questa corrente.

3.3.1 LA MODULAZIONE DEL FLUSSO

Il complesso magnetico, composto dal magnete permanente e dalle piastre polari, ha lo scopo di creare un elevato e costante flusso magnetico all'interno del traferro. In questo flusso si concatenano le spire della bobina mobile che percorse da corrente generano la forza vibromotrice.

Si richiede quindi la massima costanza a quello che è definito il flusso magnetico statico dato che dal suo valore dipende direttamente la forza generata.

All'interno del traferro, però, si sommano non linearmente diversi flussi [12]: Ψ_{static} è generato dal magnete permanente, Ψ_{vc} è il flusso generato dalla corrente circolante nella bobina mobile, $\Psi_{eddycurrent}$ è quello generato dalle correnti parassite circolanti nelle piastre polari. Infatti, la variazione di flusso generata dalla corrente nella bobina mobile induce una fem in ogni spira conduttiva; in particolare, all'interno delle piastre polari si generano delle correnti parassite

distribuite non uniformemente nella struttura metallica, ma concentrate sulla superficie a causa dell'effetto pelle [13]-[14]. Per effetto di questo comportamento l'andamento induttivo dell'impedenza della bobina mobile non può essere semplicemente modellato dall'induttanza L_e , dato che la variazione delle correnti parassita con la frequenza riduce in modo differente l'autoinduttanza della bobina [15].

La modulazione del flusso totale sposta il punto di lavoro del circuito magnetico sulla sua curva B-H, ma dato che generalmente il campo magnetico è tale da portare il punto di lavoro al di fuori della zona lineare si ha un comportamento isteretico e un cambiamento nella permeabilità dell'acciaio costituente le piastre polari.

I parametri che risentono di questo comportamento sono il fattore di forza e l'induttanza della bobina mobile:

- Il fattore di forza è dato dal prodotto $B \cdot l$, esso non è costante ma dipende dalla corrente circolante nella bobina a causa della variazione del punto di lavoro del circuito magnetico e quindi della variazione di flusso concatenato con l'avvolgimento all'interno del traferro.
- L'induttanza della bobina mobile varia con la corrente a causa della variazione nella permeabilità del circuito magnetico. La fem nell'avvolgimento dipende dalla variazione di flusso, ma il suo valore è determinato dalla riluttanza del circuito magnetico.

Esistono due principali metodi per diminuire la modulazione del flusso, ed entrambi richiedono un maggior costo nella realizzazione dell'altoparlante. Il primo consiste nel saturare il metallo del complesso magnetico nelle vicinanze del traferro mediante strozzature o un generoso incremento nelle dimensioni del magnete, in questo modo variazioni nell'induzione magnetica portano a inferiori variazioni nel campo magnetico. Si ha quindi più costanza nel flusso statico e minori variazioni di permeabilità, che fissano il valore dell'induttanza della bobina. Il secondo metodo consiste nell'accentuare il fenomeno delle correnti parassite: il flusso da esse generato si contrappone alla variazione di flusso dovuta alla corrente nella bobina mobile. Per favorire questo comportamento si introducono anelli di materiale ad alta conducibilità alla base del polo centrale (in genere è una posizione che permette di inserire un grosso anello dalla bassa resistenza, ma essendo lontano dalla bobina è poco efficace alle alte frequenze) o all'interno del traferro (dove grossi anelli comportano un abbassamento del flusso statico a causa dell'aumento delle dimensioni del traferro, ma risultano molto efficaci fino alle frequenze più elevate).

3.4 COMPORTAMENTO DELLA MEMBRANA

Fino ad ora il funzionamento della membrana è stato considerato modellabile dal comportamento di un pistone rigido avente pari diametro, questo semplifica lo studio del modello acustico

permettendo una più semplice analisi della dispersione e del funzionamento all'interno di un diffusore acustico. Ma forma e materiale del diaframma caratterizzano profondamente il comportamento dell'altoparlante, modificandone diagramma polare, risposta in frequenza e nel tempo. Nonostante questo, la semplificazione adottata da Thiele Small nel considerare la membrana un unico corpo rigido è utile e valida nell'analisi di piccolo segnale a bassa frequenza, regione per il quale il modello è stato originariamente concepito.

3.4.1 BREAK-UP E MODI DI VIBRAZIONE

Il diaframma è vincolato all'estremità esterna mediante la sospensione e internamente mediante l'incollaggio al supporto della bobina mobile. Un sistema di questo genere è caratterizzato da una successione di frequenze di risonanza, ciascuna legata ad un particolare modo di vibrazione. Si definisce modo di vibrazione una particolare configurazione assunta dalle velocità di vibrazione degli elementi del diaframma. Si definisce modo fondamentale la configurazione in cui tutte le parti del diaframma vibrano alla stessa velocità, si ha quindi il comportamento di pistone rigido. Si definiscono linee nodali le linee che separano zone che vibrano in opposizione di fase, e su di esse la velocità di vibrazione è nulla. Tutti i modi, a parte quello fondamentale, sono caratterizzati da linee nodali a forma di circonferenze, caratterizzanti i modi radiali o "a campana", o a forma di diametri, caratterizzanti le risonanze nodali o concentriche. I vari modi di vibrazione possono anche intervenire contemporaneamente, alterando significativamente la risposta in frequenza e nel tempo del trasduttore.

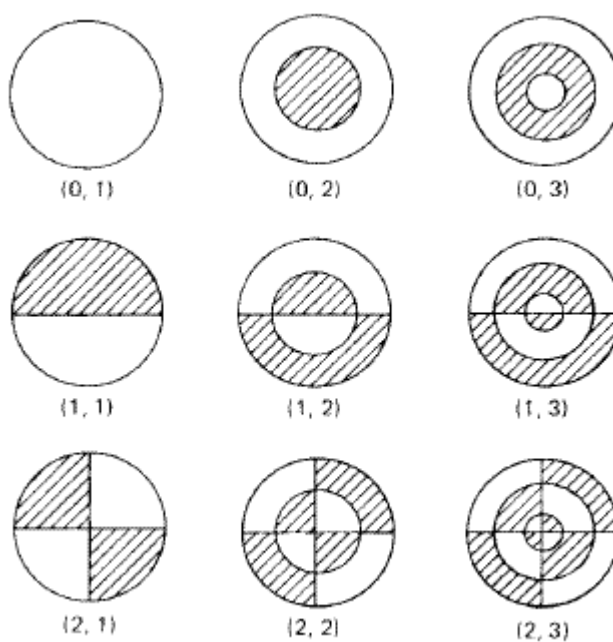


Fig. 3.10: Schematizzazione di alcuni modi di vibrazione

Gli altoparlanti per basse e medie frequenze sono caratterizzati da una membrana di forma conica o esponenziale per ottenere una maggiore rigidità a parità di peso e di diametro rispetto ad una membrana piana. In questo modo le risonanze si spostano a frequenze più elevate e l'altoparlante può essere utilizzato in un range più esteso senza incorrere in comportamenti imprevedibili, difatti massa mobile e impedenza di radiazione divengono indeterminate e variabili a seconda del modo di vibrazione attivo alla particolare frequenza.

Le intensità e le frequenze alle quali si manifestano i modi di vibrazione dipendono dalle caratteristiche della membrana:

- Il materiale utilizzato e il suo spessore
- La rigidità o modulo di Young
- L'angolazione e il profilo del cono
- Forma e proprietà meccaniche dei vincoli esterno ed interno
- Massa e rigidità del supporto e della bobina

Ed è proprio attraverso questi parametri che il progettista può agire nel tentativo di ridurre gli effetti di questi problemi. Il profilo della membrana, la scelta del materiale e del suo smorzamento interno ed una sospensione esterna che termini efficacemente il cono possono minimizzare gli effetti. Recentemente sono stati proposti molti materiali termoplastici dalle buone caratteristiche, sono utilizzate anche con successo membrane in fibra di vetro o carbonio intessute e impregnate. Corrugazioni concentriche sul cono possono servire a diminuire i modi a campana, disaccoppiando inoltre parzialmente le parti esterne del cono al salire della frequenza riprodotta. Membrane a profilo esponenziale annullano quasi del tutto i modi radiali e migliorano la risposta alle frequenze superiori, ma il diaframma così realizzato è meno rigido di uno dal profilo conico.

Teoricamente il comportamento della membrana potrebbe essere predetto da simulazioni, ma molto spesso si ricorre all'interferometria laser per una accurata misura del moto della membrana in questa particolare zona di funzionamento.

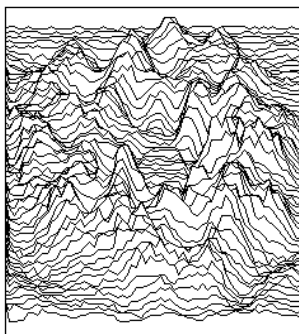


Fig. 3.11: Misura tramite interferometria laser dei breakup della membrana

3.4.2 EFFETTO DOPPLER

Quando una sorgente irradia simultaneamente segnali a bassa ed alta frequenza, il tono a frequenza maggiore subisce uno spostamento in frequenza a causa della velocità della membrana dovuta alla riproduzione del tono a bassa frequenza. In particolare, si ha un innalzamento in frequenza quando il cono si muove verso l'ascoltatore e un abbassamento quando il cono si allontana; in questo modo i toni riprodotti non sono armoniche del suono originale.

Analisi di questo fenomeno furono fatte da Beers e Belar [16] e portate avanti negli anni successivi da Klipsh [17]-[18], Moir [19] e Allison [20].

In particolare, nell'articolo di Allison l'effetto Doppler negli altoparlanti viene comparato agli effetti della variazione di velocità nei registratori a nastro e vengono effettuati diversi test di ascolto.

La modulazione percentuale in frequenza prodotta dal movimento del cono su un tono di frequenza f_2 è ricavabile dall'espressione $\Delta f_2(\%) = 100 \cdot [u_c / (c - u_c)]$, dove u_c indica la velocità del cono alla frequenza modulante f_1 e c rappresenta la velocità del suono. La formula riportata vale per un ascoltatore posto in asse al driver, e l'effetto diminuisce spostandosi rispetto all'asse di un fattore pari al coseno dell'angolo di incidenza.

L'effetto colpisce particolarmente i woofer, sottoposti a grandi escursioni per la riproduzione delle basse frequenze, ma il fatto che comunemente si usino più altoparlanti per la riproduzione dell'intero spettro musicale e che quindi non siano inviati contemporaneamente toni a frequenze basse ed elevate allo stesso driver limita fortemente la modulazione. Inoltre, l'effetto di mascheramento dei toni più bassi di grande ampiezza rispetto ai toni modulati rende il fenomeno ancora meno deleterio.

3.5 LIMITI TERMICI

L'altoparlante magnetodinamico, soprattutto se chiamato a funzionare in radiazione diretta, è un trasduttore largamente inefficiente: la trasformazione tra energia meccanica ed energia acustica è infatti particolarmente sfavorevole. Il massimo trasferimento di potenza avviene quando le resistenze di sorgente e carico sono di pari valore (per impedenze puramente resistive), o quando, a parità di parte reale, le componenti immaginarie sono uguali ed opposte. Nasce un compromesso tra efficienza e dimensioni fisiche, e soprattutto a bassa frequenza i diametri dei radiatori non sono sufficienti ad avvicinare la loro impedenza acustica a quella dell'aria circostante.

L'efficienza tipica di un woofer in radiazione diretta è tra l'1% e il 5% e la bobina mobile deve quindi dissipare il calore generato da più del 90% della potenza elettrica applicata ai morsetti dell'altoparlante.

La vernice isolante e il supporto della bobina devono essere realizzati di materiale capace di sopportare le elevate temperature raggiunte, ma pongono, in unione con le capacità di dissipazione dell'avvolgimento e del complesso magnetico, un limite alla massima potenza applicabile all'altoparlante.

Il riscaldamento della bobina e del complesso magnetico porta diversi svantaggi:

- aumenta la resistenza R_e : con un tipico pilotaggio in tensione diminuisce la corrente assorbita dal carico; si ha quindi power compression, perdita di livello di pressione sonora dovuto alla potenza applicata.
- Diminuisce il flusso magnetico statico B generato dal magnete permanente. Per piccole escursioni termiche è un processo reversibile, ma superata la temperatura di Curie il magnete perde la propria magnetizzazione (per i magneti ceramici si ha $T_c \geq 450^\circ C$, mentre per i magneti in neodimio si ha $T_c \geq 300^\circ C$).

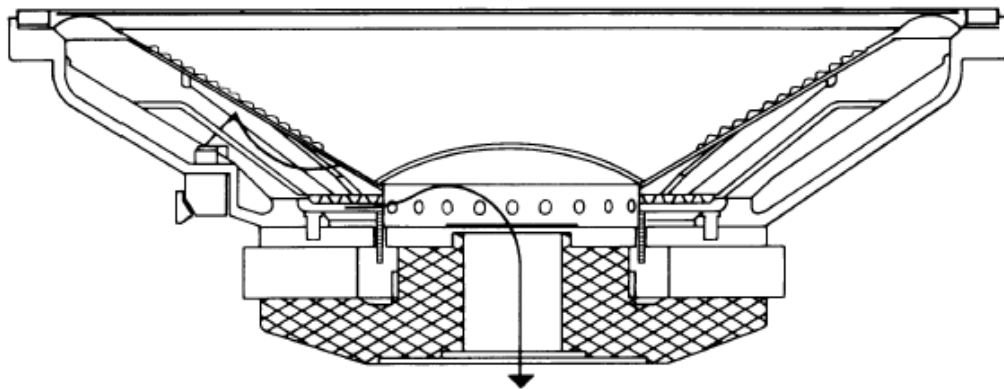


Fig. 3.12: raffreddamento di un woofer

Tecniche per incrementare il raffreddamento della bobina sono la foratura del complesso magnetico, come in figura 3.12, la foratura del supporto della bobina per permettere lo scambio tra l'aria interna ed esterna al supporto, affacciare grandi superfici metalliche ad alta conducibilità alla bobina, lasciare delle feritoie tra cestello e complesso magnetico.

Tali tecniche consentono di ridurre drasticamente la resistenza termica del sistema, ma un limite termico rimane sempre presente e causa effetti catastrofici se raggiunto.