

Prof. ENRICO PAOLINI

ACUSTICA ED ELETTROACUSTICA

Per gli Ufficiali del Corso
di specializzazione T. C.



Tipo-Litografia Accademia Navale
Livorno - 1950

Prof. ENRICO PAOLINI

ACUSTICA ED ELETTROACUSTICA

Per gli Ufficiali del Corso
di specializzazione T. C.



INTRODUZIONE

-oOo-

Fino alla fine del secolo scorso l'acustica era limitata allo studio di alcuni fenomeni di risonanza; (vibrazioni di corde, di campane, ecc.) e l'elettroacustica era inesistente.

I magistrali lavori di Lord Rayleigh, seguiti da quelli di altri della stessa scuola, hanno reso l'acustica un ramo della fisica matematica, mentre la nascita del tubo elettronico, e di conseguenza la possibilità di generazione ed amperificazione di oscillazioni, ha permesso lo sviluppo dell'elettroacustica.

La introduzione dei metodi di misure, quasi tutti elettronici, ha consentito lo sviluppo rapidissimo delle ricerche sperimentali, che oggi spesso precedono le analisi teoriche.

L'elettroacustica, che fino ad una ventina di anni fa si limitava allo studio della buona riproduzione sonora, si è oggi estesa ai campi delle applicazioni meccaniche, chimiche, biologiche, terapeutiche, architettoniche, militari, e si inserisce in molti settori delle attività industriali.

Se lo studio dell'acustica classica può ritenersi ormai completo, e tale disciplina non ha subito naturali sviluppi in questi ultimi anni; l'elettroacustica ha fatto e sta facendo continui progressi, e, come mole di problemi, numero di persone e capitali investiti, è fra le più importanti branche dell'attività umana. Ad esempio, le sele industrie di produzione e di servizio telefonico occupano nel mondo alcuni milioni di dipendenti, ed hanno maggior capitale investito di quello in qualsiasi altro genere di impresa industriale.

Nel presente scritto, destinato ai corsi di specializzazione T.C. e, con opportuni sfrondamenti da segnalarsi di volta in volta a giudizio dell'insegnante, anche ai corsi di integrazione Armi Navali, lo studio dell'acustica

ed elettroacustica è condotto secondo la linea direttiva classica, presentata da Lord Rayleigh nella sua magistrale opera: "Theory of sound", riportando solo la parte che può interessare la comprensione delle applicazioni, con particolare riguardo a quelle navali.

I problemi di acustica ed elettroacustica devono essere quindi trattati con lo stesso rigore di ogni altra disciplina esatta, ed è necessario che il lettore faccia astrazione dalla presentazione elementare che una volta era in uso.

Per la comprensione di questo testo è necessaria una discreta conoscenza dell'analisi e della radiotecnica; pur tuttavia sono richiamati i procedimenti matematici quando ciò sembri opportuno.

PROPAGAZIONE DEI SUONI

---oOo---

§1 - Teoria generale delle perturbazioni meccaniche in un fluido perfetto denso e deformabile.-

Si consideri un fluido compressibile, indefinito e non viscoso il quale, in assenza di perturbazioni, abbia una densità uniforme ρ_0 .

Si supponga che in una zona qualsiasi di esso una causa esterna produca una perturbazione, ad esempio spostando gruppi di molecole del fluido dalle loro posizioni di riposo. Tale perturbazione, per la compressibilità del fluido, si farà risentire nelle parti di fluido adiacenti alla zona suddetta, dando luogo ad un fenomeno di cui si vogliono determinare le leggi.

Per semplicità si limitano le considerazioni al caso in cui la funzione, che dà la velocità delle singole particelle del fluido ammetta un potenziale in un punto del campo; cioè il moto delle particelle del fluido sia irrotazionale.

Siano x, y, z , le coordinate di un punto generico A ; ξ^i, η^i, ζ^i , le componenti secondo gli assi coordinati della velocità delle molecole, o particelle, del fluido nel punto A , e la funzione scalare: $-\varphi(x, y, z, t)$ il potenziale di velocità. Se ρ è la densità istantanea nel punto A , si può scrivere l'equazione di continuità relativa al materiale esistente nel cubetto $dx dy dz$ di cui A è un vertice, cioè la relazione che esprime l'uguaglianza della differenza tra le masse di fluido entrante ed uscente nell'unità di tempo e l'accrescimento della massa del cubetto nell'unità di tempo.

Se $\rho \xi^i dy dz$ e $-(\rho \xi^i + \frac{\partial(\rho \xi^i)}{\partial x} dx) dy dz$ sono le masse di fluido traversanti rispettivamente le fasce

AC ed A'C' nell'unità di tempo, l'accrescimento della massa del cubetto in conseguenza dell'apporto, positivo o negativo, di materiale traversante le facce AC ed A'C' è: $-\frac{\partial(\rho Q)}{\partial x} dx dy dz$, ed analogamente per le altre coppie di facce. D'altra parte la variazione della massa del cubetto nell'unità di tempo è: $\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz$. Perciò,

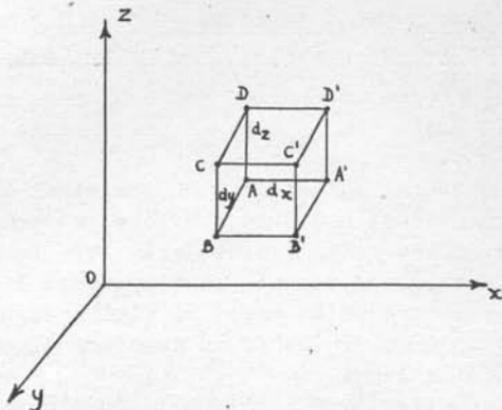


fig.1

uguagliando le due espressioni dell'accrescimento della massa del cubetto nell'unità di tempo, si ha:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left\{ \frac{\partial(\rho Q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho Q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho Q_z)}{\partial z} \right\}. \quad (I-1)$$

Si farà d'ora innanzi l'ipotesi, accettabile in pratica solo per perturbazioni al disotto di una certa entità, che ρ vari poco in funzione delle coordinate x , y , e z ; confondendosi con la ρ_0 del fluido imperturbato. Indichiamo con

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\delta \rho}{\rho_0} \quad (I-2)$$

la condensazione, cioè la variazione percentuale di densità, in cui $\delta\rho$ è l'incremento di densità rispetto alla densità ρ_0 in tutti i punti del fluido in riposo.

Derivando i due membri della (I-2) rispetto al tempo e sostituendo nelle (I-1) si ha:

$$\rho_0 \frac{\partial s}{\partial t} = -\rho_0 \left\{ \frac{\partial \xi'}{\partial x} + \frac{\partial \eta'}{\partial y} + \frac{\partial \zeta'}{\partial z} \right\}.$$

Ricordando che $-\varphi$ è la funzione potenziale di velocità; cioè che per definizione

$$\xi' = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad \eta' = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad \zeta' = -\frac{\partial \varphi}{\partial z},$$

si può scrivere:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \Delta_2 \varphi \quad (I-3)$$

ove $\Delta_2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$ è l'operatore di Laplace

ce relativo alla funzione φ .

Si scriva ora la seconda equazione della dinamica applicata alla massa del cubetto fluido supposta soggetta alle sollecitazioni del fluido contiguo. Le forze agenti normalmente alle faccie AC ed A'C' sono, in un istante generico, rispettivamente:

$$p \, dy \, dz \quad e \quad - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy \, dz,$$

in cui p è la pressione che il fluido esterno al cubetto esercita su quello del cubetto; ed analogamente per le altre coppie di faccie. Trascurando la viscosità del fluido, non compaiono forze tangenziali. Si uguagli le componenti della forza al prodotto della massa del cubetto per le componenti dell'accelerazione. Si ha:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz = \rho_0 \frac{\partial \varphi^x}{\partial t} dx dy dz ,$$

ossia, scrivendo la precedente relazione per tutte le coppie di facce:

$$\frac{\partial \varphi^x}{\partial t} dx = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} dx; \quad \frac{\partial \varphi^y}{\partial t} dy = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} dy ;$$

$$\frac{\partial \varphi^z}{\partial t} dz = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} dz .$$

Sommando membro a membro e ricordando le definizioni della funzione potenziale $-\varphi$ e l'espressione del suo differenziale totale $d\varphi$, si ha:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} dx + \frac{\partial \varphi}{\partial y} dy + \frac{\partial \varphi}{\partial z} dz \right) = \frac{1}{\rho_0} dp; \quad \frac{\partial}{\partial t} d\varphi = \frac{1}{\rho_0} dp.$$

Questa relazione è valida solo nel caso di fluidi non viscosi, perchè nei solidi o nei fluidi viscosi vanno messe in conto le forze tangenziali e l'equazione di equilibrio assume la forma che viene usata nella teoria dell'elasticità o nella idrodinamica dei fluidi reali.

Integrando questa relazione nella variabile spazio lungo un percorso qualsiasi tra il punto considerato A e un punto del piano all'infinito in cui si ammettono nulle tutte le componenti alla velocità e l'eccesso di pressione su

quella statica ambiente cioè si ammette nulla la funzione potenziale con tutte le sue derivate prime, si ha:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int d\psi = \frac{1}{\rho_0} \int d p ,$$

e cioè:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\delta p}{\rho_0} ,$$

avendo posto l'incremento finito di pressione $\delta p = \int dp$ al di sopra della pressione ambiente ρ_0 la quale ultima è uguale in ogni punto e perciò anche nei punti del piano all'infinito.

Questa relazione può essere anche scritta:

$$\delta p = \rho_0 \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (I-4)$$

e permette di calcolare la sovrappressione, nota la funzione potenziale ψ .

Per la (I-2) si ha:

$$\rho_0 = \frac{\delta p}{s} ,$$

quindi sostituendos

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = s \frac{\delta p}{\delta \rho} \quad (I-5)$$

In prima approssimazione si può ritenere, nei casi pratici, che il rapporto tra i due incrementi finiti $\delta p / \delta \rho$ sia indipendente dalle coordinate e dal tempo, ma solo dipendente dalla natura del fluido e dal suo stato fisico.

Per la (I-3) si ha perciò:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{\delta p}{\delta \rho} \Delta_2 \psi . \quad (\text{I-6})$$

Questa è una equazione differenziale di secondo ordine alle derivate parziali di forma ben nota. Se si indica con c^2 la quantità sempre positiva, $\frac{\delta p}{\delta \rho}$ cioè:

$$c = \sqrt{\frac{\delta p}{\delta \rho}} , \quad (\text{I-7})$$

la (I-5) può scriversi:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = s c^2 \quad (\text{I-8})$$

La (I-6) rappresenta una propagazione in qualunque direzione, con velocità c , di qualsiasi perturbazione definita dalla funzione ψ . Essa in generale può scriversi:

$$\psi'' = c^2 \Delta_2 \psi \quad (\text{I-9})$$

in cui gli apici indicano le derivate rispetto alla variabile tempo.

§ 2 - Velocità di propagazione.

Si possono dare diverse espressioni della velocità c . Il coefficiente di compressibilità ϵ , costante, è dato, entro i limiti di elasticità, dal rapporto tra un incremento di pressione dp e la corrispondente diminuzione percentuale di volume $\frac{dV}{V}$. Affinchè c risulti posi-

tivo, se si ammettono positivi gli aumenti di pressioni e di volume, è necessario far procedere il rapporto dal segno negativo:

$$\epsilon = - \frac{dp}{\frac{dV}{V}} ;$$

e poichè la massa ρV di materiale contenuto nel volume V non cambia, (se V è il volume dell'unità di massa $\rho V = 1$), si ha:

$\rho V = \text{cost.}$ cioè differenziando i due membri:

$\frac{dV}{V} = - \frac{d\rho}{\rho}$; e quindi, rispetto ai valori V_0, ρ_0, p_0 del mezzo in quiete, si ha:

$$\frac{\delta V}{V_0} \approx - \frac{\delta \rho}{\rho_0} ; \quad \epsilon = - \frac{dp}{\frac{d\rho}{\rho}} \approx \frac{\delta p}{\frac{\delta \rho}{\rho_0}}$$

per piccole variazioni di pressione δp e di densità $\delta \rho$ rispetto ai parametri di riposo p_0 e ρ_0 ,

$$\frac{dp}{d\rho} \approx \frac{\delta p}{\delta \rho} = \frac{\epsilon}{\rho_0} \quad (\text{I-10})$$

quindi:

$$c = \sqrt{\frac{\delta p}{\delta \rho}} \approx \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho_0}} \quad (\text{I-11})$$

Se il fluido è un gas, si può dare un'altra forma alla espressione della c applicando l'equazione di state, che nelle trasformazioni più comuni dà il legame tra la pressione e la densità. Poichè le variazioni sono generalmente così rapide da potersi considerare adiabatiche si ha:

$$pV^{\gamma} = \text{cost.}, \quad \text{cioè} \quad p \cdot \rho^{-\gamma} = \text{cost.}$$

in cui γ è il rapporto dei calori specifici C_p/C_v .

Differenziando i due membri: $\partial p \cdot \rho^{-\gamma} - p\gamma \rho^{-\gamma-1} \partial \rho = 0$

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{p\gamma}{\rho} \quad (I-12)$$

quindi, per piccole variazioni di pressione δp e di densità $\delta \rho$ si ha:

$$c = \sqrt{\frac{\delta p}{\delta \rho}} = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}}$$

$$c = \sqrt{\frac{p \cdot \gamma}{\rho_0}} \quad (I-13)$$

Se il fluido è un gas perfetto retto dalla legge generale

$$p V = R T$$

in cui V è il volume dell'unità di massa, la (I-12) diviene, per quanto è stato visto precedentemente:

$$c = \sqrt{p V \gamma} = \sqrt{R T \gamma} ;$$

cioè la velocità del suono, in un mezzo di γ costante varia con la radice della temperatura assoluta T . Se il gas è una miscela di componenti di γ diversi, nella relazione precedente si deve mettere per il valore di γ la media ponderata dei vari valori dei gas componenti.

Incidentalmente confrontando le (I-11) e (I-13), si ha nei gas

$$\epsilon = \gamma p_0 .$$

§ 3 - Onde piane ed onde sferiche.-

Nota la funzione potenziale φ si può determinare le componenti della velocità degli elementi del mezzo dalle sue derivate rispetto alle coordinate spaziali cambiate di segno, e la sovrappressione δp , cioè la pressione relativa alla perturbazione, (I-4) dalla sua derivata rispetto al tempo moltiplicata per la densità del mezzo in quiete ρ_0 .

La determinazione della funzione potenziale $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$ è possibile solo se si conoscono le condizioni al contorno di un determinato spazio.

Le condizioni ai limiti sono definite dallo stato di moto delle superfici che limitano lo spazio occupato dal mezzo cioè dalle superfici delle sorgenti di perturbazione e dalla superficie di separazione del mezzo considerato da altri mezzi, che può essere anche il piano all'infinito.

Verranno esaminati in seguito solo due casi particolari interessanti: le perturbazioni piane e quelle sferiche.

Nel caso di perturbazioni piane, ponendo la direzione di propagazione delle perturbazioni secondo l'asse x , la (I-9) diviene una equazione alle derivate parziali delle 2 variabili x e t :

$$\varphi'' = c^2 \frac{d^2 \varphi}{dx^2} \quad (I-14)$$

E' facile verificare che le funzioni $f_1(t - \frac{x}{c})$ ed $f_2(t + \frac{x}{c})$ sono due integrali particolari della (I-14); quindi l'integrale generale, che deve contenere due funzioni arbitrarie, della funzione potenziale φ risulta allora:

$$\varphi = f_1(t - \frac{x}{c}) + f_2(t + \frac{x}{c}) \quad (I-15)$$

in cui $f_1(ct - x)$ ed $f_2(ct + x)$ rappresentano 2 funzioni arbitrarie delle grandezze $(t - \frac{x}{c})$ e $(t + \frac{x}{c})$. La f_1 rappresenta una propagazione nella direzione positiva dell'asse della x e la f_2 una propagazione nella direzione negativa. Ponendo le condizioni ai limiti si definisce completamente la φ .

Le funzioni arbitrarie $f_1(t - \frac{x}{c})$ ed $f_2(t + \frac{x}{c})$ possono essere qualunque, purchè derivabili rispetto alle variabili t ed x .

Il fatto della propagazione delle perturbazioni, cioè l'assunzione dello stesso valore della φ (e quindi della velocità e della pressione che da essa conseguono) per un determinato valore della quantità $t - \frac{x}{c}$, permette di affermare che la perturbazione avviene secondo onde di moto, o più semplicemente di onde.

Le condizioni ai limiti sono determinate dalla conoscenza della funzione potenziale alla sorgente ed all'estremo del campo.

Nel caso di onde sferiche conviene passare dalle coordinate cartesiane (x, y, z) a quelle polari (r, θ, ψ) .

In tale sistema di coordinate la $\Delta_2 \varphi$ assume la forma:

$$\Delta_2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \psi^2} \right\},$$

e se vi è simmetria rispetto all'origine, cioè se l'origine delle coordinate sferiche viene posta nel centro della sorgente sonora, supposta puntiforme o di piccole dimensioni, si annullano le derivate di ψ rispetto a θ ed a φ e la $\Delta_2 \psi$ si riduce a:

$$\Delta_2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} .$$

La (I-9) perciò diviene:

$$\psi'' = c^2 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) ;$$

la quale può anche scriversi sotto la forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r\psi) = c^2 \frac{\partial}{\partial r} (r\psi) ;$$

ed analogamente alla (I-14) la soluzione è:

$$r\psi = \varphi_1 \left(t - \frac{r}{c} \right) + \varphi_2 \left(t + \frac{r}{c} \right)$$

$$\psi = \frac{1}{r} \varphi_1 \left(t - \frac{r}{c} \right) + \frac{1}{r} \varphi_2 \left(t + \frac{r}{c} \right)$$

Il primo termine rappresenta un'onda divergente dall'origine ed il secondo termine un'onda convergente verso l'origine, entrambe con velocità c .

Consideriamo ad esempio la sola onda divergente, cioè quella emessa dalla sorgente nell'origine (è il caso più frequente in pratica, quando si ha, ad es., una sorgente

in un mezzo indefinito). La funzione potenziale diviene:

$$\varphi = \frac{1}{r} \varphi_1 \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

In luogo della sovrappressione δp , per semplicità di notazioni, si scriva semplicemente p , ed in luogo della densità ρ_0 del mezzo imperturbato, si scriva semplicemente ρ .

Ponendo $z = t - \frac{r}{c}$, la velocità ξ , secondo il raggio r , e la pressione risultano:

$$\xi = - \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{\varphi_1}{r^2} + \frac{1}{rc} \frac{d\varphi_1}{dz}$$

$$p = \rho \varphi' = \frac{\rho}{r} \frac{d\varphi_1}{dz} \quad .$$

Il rapporto tra la pressione e la velocità è:

$$\frac{p}{\xi} = \rho c \frac{1}{1 + \frac{c}{r} \frac{\varphi_1}{\frac{d\varphi_1}{dz}}} \quad (\text{I-16})$$

La frazione ha in generale un valore complesso, e solo le condizioni ai limiti, definendo l'espressione della funzione φ_1 , permettono di ricavarlo esattamente.

Si può però fin da ora affermare che, ad una notevole distanza r dall'origine, il secondo termine del denomi-

natore della frazione è trascurabile di fronte all'unità, e quindi la pressione risulta proporzionale alla velocità secondo il fattore di proporzionalità ρc il quale è funzione della natura del mezzo in cui si propagano le perturbazioni.

$$\frac{p}{\xi} = \rho c \quad (I-17)$$

Questa grandezza si chiama resistenza acustica di radiazione sonora ed è un parametro caratteristico di ogni mezzo fluido.

§ 4 - Perturbazioni con andamento sinusoidale.-

Supponiamo, ad esempio, che la funzione potenziale abbia un andamento sinusoidale:

$$\varphi = \frac{a}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

in cui a ed ω sono due costanti arbitrarie.

Il caso particolare di andamento sinusoidale è tuttavia assai generale, in quanto se la φ ha un andamento periodico è scomponibile in serie di Fourier di componenti sinusoidali di frequenze discrete e ampiezze finite; se la φ non è periodica, è rappresentabile per mezzo dell'integrale di Fourier da componenti sinusoidali di frequenze continue ed ampiezze infinitesime.

La velocità assume la forma:

$$\dot{\xi}(r) = - \frac{a\omega}{rc} \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) + \frac{a}{2} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (I-18)$$

e la pressione:

$$p(r) = \rho_0 \varphi' = - \frac{a \omega \rho_0}{r} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{r}{c} \right). \quad (\text{I-19})$$

E' quindi il rapporto:

$$\frac{p}{\rho_0 \omega} = \frac{\rho \omega \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)}{\frac{\omega}{c} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) - \frac{1}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)} = \rho c \frac{1}{1 - \frac{c}{\omega r} \operatorname{tang} \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)}.$$

Si può eseguire lo stesso calcolo col metodo simbolico; in tal caso la funzione potenziale si scrive:

$$\varphi = \frac{a}{r} e^{j\omega \left(t - \frac{r}{c} \right)}.$$

E' ancora:

$$\dot{\varphi} = - \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{a}{r^2} e^{j\omega \left(t - \frac{r}{c} \right)} + j \frac{a\omega}{rc} e^{j\omega \left(t - \frac{r}{c} \right)}$$

$$p = \rho \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial t} = j\rho \frac{a}{r} \omega e^{j\omega \left(t - \frac{r}{c} \right)} ;$$

da cui si ricava il rapporto:

$$\frac{p}{\rho_0 \omega} = \frac{j \omega \rho}{\frac{1}{r} + j \frac{\omega}{c}}$$

$$\frac{p}{\psi'} = \rho c \frac{\frac{j\omega}{rc} + \frac{\omega^2}{c^2}}{\frac{1}{r^2} + \frac{\omega^2}{c^2}} = \rho c \left\{ \frac{\frac{\omega^2 r^2}{c^2}}{1 + \frac{\omega^2 r^2}{c^2}} + j \frac{\frac{\omega r}{c}}{1 + \frac{\omega^2 r^2}{c^2}} \right\}$$

e quindi:

$$\frac{p}{\psi'} = \rho c \left\{ \frac{1}{1 + \frac{c^2}{\omega^2 r^2}} + j \frac{\frac{c}{\omega r}}{1 + \frac{c^2}{\omega^2 r^2}} \right\} = x + jy. \quad (I-20)$$

Dalla (I-20) si può dedurre che, essendo complesso il rapporto $\frac{p}{\psi'}$, le due grandezze p e ψ' non sono in fase fra di loro e lo sfasamento α in un punto a distanza r dall'origine è dato da:

$$\text{tang } \alpha = \frac{c}{\omega r} .$$

Al crescere della distanza, il termine reale tende al valore ρc mentre quello immaginario tende a zero cosicché per valori di r tali da rendere

$$\frac{c^2}{\omega^2 r^2} \ll 1$$

si può scrivere ancora $\frac{p}{\psi'} = \rho c$,

e cioè a distanze molto grandi dalla sorgente, pressione e velocità sono in fase e proporzionali fra loro (fig.2), mentre in vicinanza della sorgente pressione e velocità tendono a divenire in quadrature.

L'andamento della ampiezza della pressione p , in

funzione della distanza r è rigorosamente iperbolico mentre quello della velocità ξ' è iperbolico per distanze r assai elevate ($r \gg c/\omega$), mentre cresce più rapidamente della legge iperbolica per r diminuite e tendente a zero (fig.3).

Il flusso delle velocità attraverso una superficie sferica di raggio r con centro nell'origine è:

$$4\pi r^2 \xi' = 4\pi a \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) - \frac{4\pi a \omega r}{c} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (I-21)$$

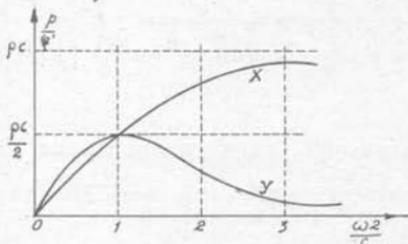


fig.2

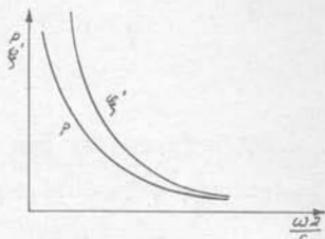


fig.3

Se r_0 è il raggio infinitesimo dalla sorgente sonora, immaginata puntiforme, facendo tendere r ad r_0 e quindi a zero si ha dalla (I-21) che il flusso della velocità è:

$$4\pi a \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) = \Phi_V \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

in cui:

$$\Phi_V = 4\pi a$$

è l'ampiezza del flusso della velocità.

Si ricava quindi il valore della costante a :

$$a = \frac{\Phi_V}{4\pi} \quad (I-22)$$

La condizione che per r tendente all'infinito Φ tende allo zero, e quindi tendono a zero pure ξ' e p , è automaticamente soddisfatta, e non introduce nessuna nuova relazione che permetta di determinare ω ; quindi la ω resta una grandezza arbitraria nelle leggi che regolano la pro-

pagazione.

Sostituendo alla costante a il suo valore (I-22) si ottengono le espressioni di ψ , ξ' , e p :

$$\psi = \frac{\Phi v}{4\pi r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

$$\xi' = \frac{\Phi v}{4\pi r^2} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) - \frac{\omega \Phi v}{4\pi r c} \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (I-23)$$

$$p = -\rho \frac{\omega \Phi v}{4\pi r} \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (I-24)$$

La forza totale agente su una superficie sferica di raggio r è:

$$F = 4\pi r^2 p = -\rho r \omega \Phi v \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

La potenza istantanea è quindi:

$$F \xi' = -\rho \frac{\omega \Phi^2 v}{4\pi r} \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) + \\ + \frac{\omega^2 \Phi^2 v}{4\pi c} \sin^2 \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) .$$

Poichè tale potenza è variabile nel tempo, la potenza media sarà:

$$P = \frac{1}{T} \int_T F \xi' dt$$

in cui il tempo T è il periodo, ad un multiplo del periodo, ossia:

$$P = \frac{1}{T} \int_T \left\{ -\rho \frac{\omega \Phi^2 v}{4\pi r} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) + \rho \frac{\omega^2 \Phi^2 v}{4\pi c} \operatorname{sen}^2 \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \right\} dt;$$

essendo zero l'integrale del primo termine e pari ad $1/2$ il valore medio del quadrato del suo, si ricava:

$$P = \frac{1}{2} \rho \frac{\Phi_v^2 \omega^2}{4\pi c},$$

e quindi la potenza media sonora che transita attraverso la unità di superficie (potenza specifica) è:

$$P_s = \frac{1}{2} \frac{\rho \Phi_v^2 \omega^2}{16 \pi r^2 c} = \frac{1}{2} \rho c \frac{\Phi_v^2 \omega^2}{16 \pi r^2 c^2}. \quad (I-25)$$

Per r molto grande rispetto a $\frac{c}{\omega}$ il valore massimo di ξ' è dato dalla (I-23):

$$\xi'_{\max} = - \frac{\omega \Phi_v}{4 \pi r c}$$

mentre dalla (I-24) si ha:

$$P_{\max} = -\rho \frac{\omega \bar{\Phi}_V}{4\pi r} = \rho c \left(\frac{v}{r} \right)_{\max}^2$$

Sostituendo i valori ora trovati nella (I-25) si hanno due nuove espressioni per la potenza specifica:

$$P_s = \frac{1}{2} \rho c \left(\frac{v}{r} \right)_{\max}^2$$

$$P_s = \frac{1}{2} \frac{P_{\max}^2}{\rho c}$$

Confrontando le tre espressioni ultime con quelle della elettrotecnica, nel caso di correnti alternate sinusoidali,

$$V = RI, \quad P = \frac{R I_{\max}^2}{2}, \quad P = \frac{1}{2} \frac{V_{\max}^2}{R},$$

si nota, fra grandezze elettriche ed acustiche una corrispondenza che può essere riassunta, per le grandezze sino ad ora incontrate dal seguente prospetto:

Grandezze elettriche	V	I	R	P
Grandezze acustiche	p	$\left(\frac{v}{r} \right)$	ρc	$P_{\text{spec.}}$

Per questa ragione alla quantità ρc si dà il nome di resistenza acustica o resistenza di radiazione del mez-

zo considerato e si misura in Ohm acustici.

Le considerazioni esposte fin'ora nel caso di sorgente puntiforme, si possono estendere ad una sorgente qualsiasi immaginando questa scomposta in tanti elementi, ognuno dei quali sia praticamente puntiforme, e calcolando, mediante un'integrazione, il potenziale di velocità dovuto all'intera sorgente in ogni punto del campo.

§ 5) - Propagazione del suono in un condotto uniforme.

Nel caso di onde piane (§ 3) cioè quando la funzione potenziale ha gli stessi valori su tutti i punti di un piano e ciò avviene su un fascio di piani paralleli, l'equazione (I-6) assume come si è visto la forma:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \quad (\text{I-26})$$

in cui x è la coordinata corrente disposta nella direzione normale ai piani del fascio.

Perciò lo spostamento ψ , la velocità ψ' e la pressione p sono definiti da relazioni differenziali analoghe alla (I-26)

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial^2 \psi'}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \psi'}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

Una soluzione particolare della (I-26) è:

$$\varphi = \varphi_0 e^{j\omega \left(t - \frac{x}{c}\right)} \quad (I-27)$$

e quindi

$$\dot{\varphi} = - \frac{\partial \varphi}{\partial x} = j \frac{\omega \varphi_0}{c} e^{j\omega \left(t - \frac{x}{c}\right)} = j \frac{\omega}{c} \varphi \quad (I-28)$$

$$p = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} = j\omega \rho \varphi_0 e^{j\omega \left(t - \frac{x}{c}\right)} = j\omega \rho \varphi \quad (I-29)$$

Il rapporto tra, pressione e velocità, che rappresenta l'impedenza di radiazione sotto cui lavora ogni unità di superficie del generatore sonoro, è come si è già visto, costante, reale e positiva, e pari a ρc .

Nei casi reali il fluido nel quale transita l'onda sonora ha un certo coefficiente di viscosità μ che, secondo la definizione di Maxwell, è misurato dalla forza tangenziale F , per unità di area che esiste, tra due piani orizzontali distanza unitaria, di cui l'uno si muova rispetto all'altro parallelamente a se stesso con velocità unitaria essendo lo spazio tra i due piani riempito del fluido viscoso. Cioè:

$$F = - \mu S \frac{\partial v}{\partial x},$$

dove S è la superficie di ciascuna delle porzioni dei piani considerati. Il segno negativo sta ad indicare che F diminuisce all'aumentare del gradiente di velocità $\frac{\partial v}{\partial x}$.

Il Lamb⁽¹⁾ ha calcolato che, in tal caso, l'equazione del moto diviene:

(1) - Lamb: Teoria dinamica del suono, § 64.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{4\mu}{3\rho} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$$

Un integrale particolare, come è facile verificare, è:

$$\psi = A e^{-\beta x} e^{j\omega \left(t - \frac{x}{c}\right)}$$

in cui, in prima approssimazione, essendo $\beta \ll \frac{\omega}{c}$,

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{\mu \omega^2}{\rho c^3} \quad (I-30)$$

Da questa relazione si osserva che l'attenuazione β cresce col quadrato della frequenza; essa, per materiali avente viscosità normale, comincia a dare effetti sensibili di attenuazione, nel campo degli ultrasuoni ($f > 20$ k c/1).

Quando un fluido è contenuto in un condotto rigido, la viscosità si può avere tra elemento ed elemento di fluido ed, in misura ancora maggiore, tra elementi di fluido e pareti. Le forze in gioco sono tanto maggiori quanto più le pareti sono estese rispetto alle dimensioni trasversali del condotto, e se nell'equilibrio dinamico degli elementi del mezzo le forze vischiose sono preponderanti rispetto alle forze d'inerzia ed a quelle di reazione elastica, si dice che il moto del fluido è lamellare, od ha luogo secondo il regime di Poiseuille.

Tuttavia nel campo dei suoni audibili, fino cioè ad una diecina di kilohertz e per fluidi usuali, è generalmente lecito trascurare la forza di attrito di fronte alle forze elastiche ed inerziali, cosicchè nel caso di onde piane di andamento sinoidale, l'equazione che definisce il potenziale di velocità ψ è la (I-27) mentre la (I-28) e

(I-29) definiscono la velocità \mathcal{E}' e la pressione p .

Derivando rispetto ad x le relazioni suddette si ottiene:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -j\omega \rho \left(j \frac{\omega}{c} \varphi \right) = -j\omega \rho \mathcal{E}' ,$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}'}{\partial x} = -\frac{j\omega}{c} \left(j \frac{\omega}{c} \varphi \right) = -j \frac{\omega}{c^2 \rho} p$$

o, per la (I-11) :

$$\frac{\partial \mathcal{E}'}{\partial x} = -j \frac{\omega}{c} p$$

Queste relazioni sono del tutto analoghe a quelle che si ottengono studiando la propagazione della tensione v e della corrente i lungo una linea costituita da induttanza L_1 e capacità C_1 per unità di lunghezza distribuite uniformemente lungo la linea stessa, alimentata in una grandezza elettrica di andamento sinusoidale. Si riepiloga qui rapidamente il procedimento analitico.

Dall'elettrotecnica è noto che in tal caso; tra le ampiezze delle grandezze sinoidali sussistono le relazioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial x} = -j\omega L_1 i \\ \frac{\partial i}{\partial x} = -j\omega C_1 v \end{array} \right. \quad (I-31)$$

da cui si ricava:

$$-\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \omega^2 L_1 C_1 v$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \omega^2 L_1 C_1 i$$

gli integrali generali, prescindendo dal fattore di rotazione $e^{j\omega t}$, sono:

$$v = A \operatorname{sen} ax + B \operatorname{cos} ax$$

$$i = M \operatorname{sen} ax + N \operatorname{cos} ax$$

dove $\alpha = \omega \sqrt{L_1 C_1} = \frac{\omega}{c}$, c è la velocità di propagazione delle perturbazioni lungo la linea $A, B, M,$ ed N , quattro costanti determinabili, due direttamente e due altre con le condizioni al contorno. Per sostituzione nelle (I-31) si ha subito, uguagliando i coefficienti che moltiplicano il seno ed il coseno.

$$N = j \frac{A}{R_0}$$

$$M = -j \frac{B}{R_0}$$

in cui $R_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$; e quindi

$$v = A \operatorname{sen} ax + B \operatorname{cos} ax$$

$$i = -j \frac{B}{R_0} \operatorname{sen} ax + j \frac{A}{R_0} \operatorname{cos} ax$$

Supponendo che sia nota la tensione v_0 applicata ad un estremo della linea e l'impedenza z su cui è chiusa la linea all'altro estremo distante l dal primo estremo, si ha:

$$\begin{array}{lll} \text{per} & x = 0 & v = v_0 \\ & x = l & \frac{v}{i} = z \end{array}$$

da cui:

$$B = v_0$$

$$z = \frac{A \operatorname{sen} al + v_0 \cos al}{-j \frac{v_0}{R_0} \operatorname{sen} al + j \frac{A}{R_0} \cos al},$$

dalla quale si ricava l'ultima costante:

$$A = v_0 \frac{R_0 \cos al + j z \operatorname{sen} al}{-R_0 \operatorname{sen} al + j z \cos al} = v_0 Y ;$$

in cui Y indica la frazione, cioè, una quantità complessa, ma nota. Si ottiene infine, sempre prescindendo dal fattore di rotazione $e^{j\omega t}$:

$$v = v_0 Y \operatorname{sen} ax + v_0 \cos ax ,$$

$$i = -j \frac{v_0}{R_0} \operatorname{sen} ax + j \frac{v_0}{R_0} Y \cos ax .$$

Tutte le precedenti relazioni riguardanti la propagazione di un'onda elettrica sinusoidale lungo una linea a costanti non dissipative possono essere, con una rotazione di simboli, utilizzate per la propagazione di un suono in un condotto a sezione uniforme, purchè si ponga:

- in luogo della tensione v , la pressione sonora p
- " " " corrente i , la velocità v degli elementi del mezzo.
- " " " induttanza L_1 , per unità di lunghezza di linea, la densità ρ .
- " " " capacità C_1 per unità di lunghezza di linea, l'inverso $\frac{1}{\epsilon}$ del coefficiente di compressibilità.

La pressione p e la velocità v degli elementi del mezzo, in una sezione generica del condotto di coordinata x , sono:

$$p = p_0 \left(Y \operatorname{sen} \frac{\omega x}{c} + \cos \frac{\omega x}{c} \right) \quad (\text{I-32})$$

$$v = \frac{p_0}{\rho c} \left(-j \operatorname{sen} \frac{\omega x}{c} + jY \cos \frac{\omega x}{c} \right) \quad (\text{I-33})$$

in cui p_0 è la pressione sonora generata ad una delle estremità del condotto, e

$$\gamma = \frac{\rho c \cos al + jz \operatorname{sen} al}{-\rho c \operatorname{sen} al + jz \cos al} ;$$

ove z è l'impedenza acustica della chiusura dell'altro terminale del condotto a distanza l dal primo.

Con queste due relazioni (I-32) e (I-34) si determinano completamente tutte le grandezze in giuoco, in modulo e fase, dell'onda sonora.

Si può vedere facilmente che un condotto chiuso alle estremità con una resistenza acustica pari a ρc si comporta come un tubo indefinito.

Se $z = \rho c$, è $\gamma = -j$ e quindi:

$$p = p_0 \left(\cos \frac{\omega}{c} x - j \operatorname{sen} \frac{\omega}{c} x \right) = p_0 e^{-j \frac{\omega}{c} x}$$

$$v = \frac{p_0}{\rho c} \left(\cos \frac{\omega}{c} x - j \operatorname{sen} \frac{\omega}{c} x \right) = \frac{p_0}{\rho c} e^{-j \frac{\omega}{c} x}$$

Se il tubo è chiuso ad un estremo con una superficie rigida, si ha: per $x = l$ $z = \infty$

$$\gamma = \frac{\operatorname{sen} \frac{\omega}{c} l}{\cos \frac{\omega}{c} l}$$

e quindi le ampiezze della pressione e della velocità sono:

$$p = p_0 \frac{\cos \frac{\omega(1-x)}{c}}{\cos \frac{\omega l}{c}}$$

$$v_e = j \frac{p_0}{\rho c} \frac{\text{sen} \frac{\omega(l-x)}{c}}{\cos \frac{\omega l}{c}}$$

per $l = 2n \frac{\lambda}{4}$, con n intero qualsiasi, si ha:

$$\frac{\omega l}{c} = 2n \frac{\pi}{2}$$

$$\left\{ \begin{aligned} p &= p_0 \cos \frac{\omega x}{c} e^{j\omega t} \\ v_e &= -j \frac{p_0}{\rho c} \text{sen} \frac{\omega x}{c} e^{j\omega t} \end{aligned} \right.$$

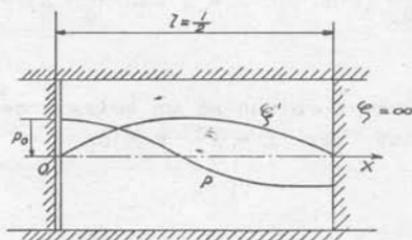


fig.4

cioè si ha un'andamento di onde stazionarie.

In fig. 4 è riportato l'andamento della pressione e delle velocità per $n = 0$.

Un analogo andamento di onde stazionarie si ha se il tubo è aperto ad un estremo, cioè per $x = l$, $z = 0$.

Le (I-32) e (I-33) divengono:

$$p = p_0 \frac{\text{sen } \frac{\omega(1-x)}{c}}{\text{sen } \frac{\omega l}{c}}$$

$$p' = -j \frac{p_0}{\rho c} \frac{\cos \frac{\omega(1-x)}{c}}{\text{sen } \frac{\omega l}{c}}$$

e per $l = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}$ si ha:

$$\frac{\omega l}{c} = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p = p_0 \cos \frac{\omega x}{c} e^{j\omega t} \\ p' = -j \frac{p_0}{\rho c} \text{sen } \frac{\omega x}{c} e^{j\omega t} \end{array} \right.$$

Per $n = 0$, gli andamenti di p e p' sono riportati in fig. 5. In pratica è tuttavia assai difficile che si presenti il caso di un condotto riempite del mezzo prescelto fino ad $x = l$ ed oltre vi sia il vuoto.

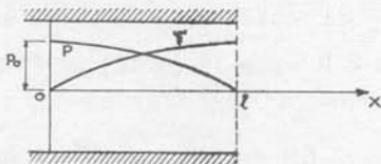


fig.5

Un caso molto interessante si presenta quando si ha, in un condotto a sezione uniforme, il passaggio di un'onda sonora da un mezzo di resistenza acustica $\rho_1 c_1$ ad uno di resistenza acustica diversa $\rho_2 c_2$.

Per la corrispondenza fra i fenomeni acustici ed elettrici si può affermare che sulla superficie di separazione dei due mezzi si avrà una riflessione e solo una parte della potenza incidente si propagherà nel secondo mezzo.

Si vuol ora esaminare se sia possibile, mediante l'interposizione fra i due mezzi del condotto di un terzo mezzo di resistenza acustica $\rho_x c_x$, far sì che tutta la potenza transitante nel primo tratto si trasferisca nel secondo (fig.6).

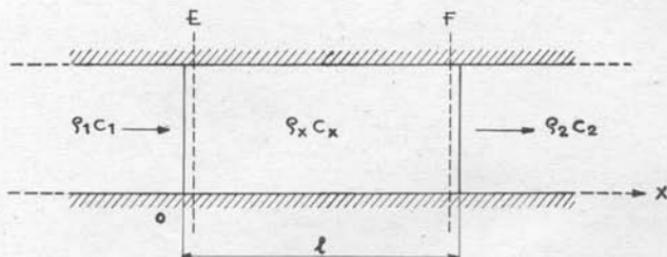


fig.6

Perchè ciò avvenga è necessario che la $\rho_x c_x$ e la lunghezza l del mezzo interposto siano tali che il rapporto $\frac{p}{\xi}$ nel mezzo interposto assuma nella sezione E il valore $\rho_1 c_1$ e nella sezione F il valore $\rho_2 c_2$.

Nel tratto E F, per le (I-32) ed (I-33) si ha:

$$\begin{cases} p = p_0 \left(Y \operatorname{sen} \frac{\omega x}{c_x} + \cos \frac{\omega x}{c_x} \right) \\ \xi = j \frac{p_0}{\rho_x c_x} \left(\operatorname{sen} \frac{\omega x}{c_x} + Y \cos \frac{\omega x}{c_x} \right) \end{cases}$$

ponendo

$$\text{per } x = 0 \quad \frac{p}{\xi'} = \rho_1 c_1$$

$$\text{per } x = 1 \quad \frac{p}{\xi'} = \rho_2 c_2.$$

si ha:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 c_1 = -j \frac{\rho_x c_x}{Y} \\ \rho_2 c_2 = \rho_x c_x \frac{Y \operatorname{sen} \frac{\omega l}{c_x} + \cos \frac{\omega l}{c_x}}{-j \operatorname{sen} \frac{\omega l}{c_x} + j Y \cos \frac{\omega l}{c_x}} \end{array} \right.$$

e sostituendo nella seconda relazione il valore di Y ricavato dalla prima:

$$\rho_2 c_2 \left(-j \operatorname{sen} \frac{\omega l}{c_x} + \frac{\rho_x c_x}{\rho_1 c_1} \cos \frac{\omega l}{c_x} \right) = -j \frac{\rho_x^2 c_x^2}{\rho_1 c_1} \operatorname{sen} \frac{\omega l}{c_x} + \rho_x c_x \cos \frac{\omega l}{c_x} .$$

Uguagliando fra loro le parti reali e quelle immaginarie si ottiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_2 c_2 \rho_1 c_1 \operatorname{sen} \frac{\omega l}{c_x} = \rho_x^2 c_x^2 \operatorname{sen} \frac{\omega l}{c_x} \\ \rho_2 c_2 \cos \frac{\omega l}{c_x} = \rho_1 c_1 \cos \frac{\omega l}{c_x} \end{array} \right.$$

Poichè, per le ipotesi fatte, è $\rho_1 c_1 \neq \rho_2 c_2$, la soluzione è:

$$\rho_x c_x = \sqrt{\rho_2 c_2 \rho_1 c_1} \quad \cos \frac{\omega l}{c_x} = 0 \quad (I-34)$$

da cui:

$$\frac{\omega l}{c_x} = (2k + 1) \frac{\pi}{2}$$

$$l = (2k + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (I-35)$$

Si può quindi concludere che il tratto interposto, di resistenza acustica uguale alla media geometrica delle due resistenze acustiche e di lunghezza un multiplo dispari del quarto d'onda, funziona da adattatore di impedenze e permette la trasmissione integrale dell'energia sonora da un mezzo all'altro. Ovviamente l'adattamento di impedenze che vale per propagazione dell'energia sonora dal primo al secondo mezzo vale anche per propagazione del secondo al primo mezzo.

Fino a questo punto sono state analizzate le relazioni che determinano la pressione e la velocità v degli elementi di un mezzo, il quale è sede di un'onda piana, ossia di un'onda che si propaga parallelamente a se stessa, lungo un condotto a sezione uniforme. Si è supposto che ad un estremo ($x = 0$) del condotto vi sia un generatore di pressione di ampiezza p_0 , ed all'altro estremo ($x = l$) il condotto sia terminato da un secondo mezzo la cui impedenza di entrata è $Z = \left(\frac{p}{v} \right)_{x=l}$. Le relazioni (I-32) e (I-33) dan

no la pressione e la velocità nel primo mezzo.

Non si sono finora calcolati i parametri del suono che si propaga nel secondo mezzo, ma non sarebbe difficile cal-

colarli conoscendo la resistenza caratteristica $\rho_2 c_2$ del secondo mezzo.

Peraltro si ritiene qui opportuno determinare direttamente la grandezza p_t e ξ'_t dell'onda sonora trasmessa nel secondo mezzo e p_r e ξ'_r dell'onda riflessa nel primo mezzo in funzione delle grandezze p_i e ξ'_i dell'onda piana incidente.

Per maggior generalità si considera qui un'onda incidente non normalmente sul piano di separazione tra i due mezzi.

Si indichino con gli indici i , r e t rispettivamente le grandezze che si riferiscono al raggio sonoro incidente, al raggio riflesso ed al raggio trasmesso (figura 7).

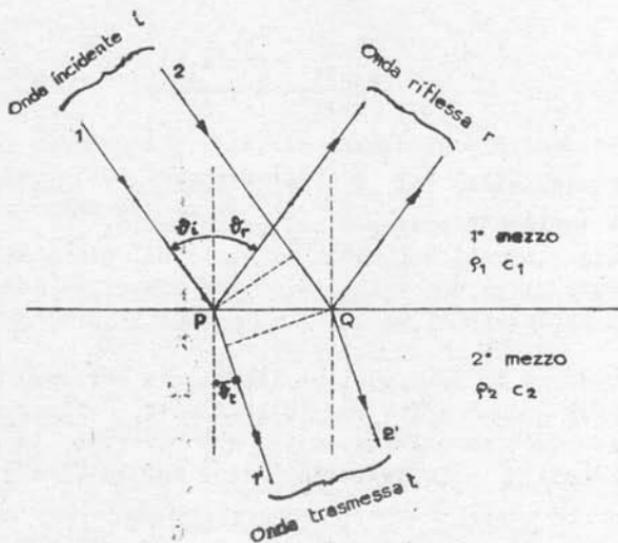


fig.7

Sul piano di separazione si deve avere continuità del movimento secondo la normale al piano di separazione stes-

so, in quanto non vi può essere distacco degli elementi del materiale gli uni dagli altri, e si deve avere continuità della pressione. Per contro può esservi una discontinuità della componente tangenziale della velocità in quanto il primo mezzo può scorrere rispetto al secondo, sul piano di separazione.

I raggi sonori 1 e 2 di un'onda piana nel primo mezzo, (fig.7) incontriamo il piano di separazione nei punti P e Q formando un angolo θ_i con la normale al piano stesso ed i raggi trasmessi 1' e 2' formano l'angolo θ_t con la normale. Il fronte d'onda del raggio 2 incontra il piano un tempo $\frac{PQ \sin \theta_i}{c_1}$ dopo il raggio 1 e, nello stesso

tempo il raggio 1' ha percorso con la velocità c_2 il tratto $PQ \sin \theta_t$. Dall'uguaglianza di questi due tempi si ottiene:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2} .$$

Ovviamente è poi $\theta_i = \theta_r$, essendo l'onda riflessa e quella incidente entrambe nel primo mezzo.

Gli elementi del mezzo giacenti nel piano di separazione devono avere una velocità ed una pressione determinata sia se appartenenti al primo mezzo, sia se appartenenti al secondo.

Siccome la propagazione del raggio riflesso è in senso contraria a quella del raggio incidente, fissato un senso positivo dell'asse delle x , a cui riferire in segno gli spostamenti ξ e le velocità ξ' ; è per la (I-17)

$$p_i = \rho_1 c_1 \xi'_i$$

$$p_r = - \rho_1 c_1 \xi'_r \quad (I-36)$$

$$p_t = \rho_2 c_2 \xi'_t$$

dove al solito ξ' rappresenta la velocità istantanea degli elementi del mezzo e p la pressione.

Per la continuità della pressione e delle componenti delle velocità secondo la normale alla superficie di separazione dei due mezzi, si ottiene:

$$p_i + p_r = p_t \quad (I-37)$$

$$\xi'_i \cos \theta_i + \xi'_r \cos \theta_r = \xi'_t \cos \theta_t$$

Combinando le (I-36) con le (I-37) si ottiene:

$$\rho_1 c_1 (\xi'_i - \xi'_r) = \rho_2 c_2 \xi'_t$$

Nel primo mezzo l'angolo d'incidenza e quello di riflessione devono essere uguali $\theta_i = \theta_r$; quindi con semplici passaggi si ricava:

$$\frac{\xi'_r}{\xi'_i} = \frac{-\rho_1 c_1 \cos \theta_t - \rho_2 c_2 \cos \theta_i}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t}$$

$$\frac{\xi'_t}{\xi'_i} = \frac{2 \rho_1 c_1 \cos \theta_i}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t}$$

La conoscenza di questi due rapporti, che sono funzioni unicamente delle caratteristiche dei due mezzi e dell'angolo di incidenza, permette di calcolare le velocità, del-

le onde riflessa e trasmessa. In modo del tutto analogo si otterrebbero i rapporti p_r/p_i e p_t/p_i .

Se il raggio sonoro incide normalmente alla superficie di separazione, è $\theta_i = \theta_t = 0$; ed allora:

$$\left\{ \begin{aligned} k_r &= \frac{\sum_i' r}{\sum_i' i} = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \\ k_t &= \frac{\sum_i' t}{\sum_i' i} = \frac{2 \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \end{aligned} \right. \quad (\text{I-38})$$

e dalle (I-36)

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{p_2}{p_i} &= \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \\ \frac{p_t}{p_i} &= \frac{2 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \end{aligned} \right. \quad (\text{I-39})$$

Il rapporto r tra la potenza specifica, riflessa $\frac{\rho_1 c_1}{2} \xi_{or}'^2$ e quella incidente $\frac{\rho_1 c_1}{2} \xi_{oi}'^2$, in cui ξ_{or}' , ξ_{ot}' , ξ_{oi}' sono i valori massimi, si chiama coefficiente di riflessione:

$$r = \frac{\frac{\rho_1 c_1}{2} \xi_{or}'^2}{\frac{\rho_1 c_1}{2} \xi_{oi}'^2} = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2 \quad (\text{I-40})$$

Il rapporto t tra la potenza specifica trasmessa

$$\frac{\rho_2 c_2}{2} \int_{S_0 t}^2 \quad \text{e quella incidente} \quad \frac{\rho_1 c_1}{2} \int_{S_0 i}^2 \quad \text{si chiama}$$

rapporto di trasmissione:

$$t = \frac{4 \rho_1 \rho_2 c_1 c_2}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2} \quad (\text{I-41})$$

si può notare che $t = 1 - r$, come del resto, per il principio della conservazione dell'energia, si poteva fin da principio asserire.

Quando il secondo mezzo è costituito da materiale non omogeneo (quali ad es. quelli normalmente impiegati nelle costruzioni), il rapporto $\frac{p}{S}$ non è uguale a $\rho_2 c_2$ ma assume un valore Z comunque complesso.

Basta in tal caso sostituire, nelle formule ora scritte, a $\rho_2 c_2$ il valore Z dell'impedenza acustica ricavato sperimentalmente.

$$\frac{\int_{S_0}^2 r}{\int_{S_0}^2 i} = \frac{\rho_1 c_1 - Z}{\rho_1 c_1 + Z}$$

$$\frac{\int_{S_0}^2 r}{\int_{S_0}^2 i} = \frac{2 \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + Z}$$

Dalla (I-38) e (I-39) si rileva che se la resistenza acustica $\rho_2 c_2$ del secondo mezzo è infinitamente maggiore od infinitamente minore di quella $\rho_1 c_1$ del primo, la riflessione è totale. Quando si vuole invece trasmettere il

più possibile integralmente il suono da un mezzo ad un altro, cioè t sia prossimo ad 1, occorre che le resistenze acustiche dei due mezzi differiscano il meno possibile tra di loro.

L'impedenza acustica in un punto del primo mezzo in vicinanza immediata del piano di separazione dal secondo mezzo è, per le (I-36).

$$\bar{z} = \frac{p_i + p_r}{\frac{v_i}{c_1} + \frac{v_r}{c_1}} = \frac{p_i}{\frac{v_i}{c_1}} \frac{1 + \frac{p_r}{p_i}}{1 + \frac{v_r}{v_i}} = \rho_1 c_1 \frac{1 - k_r}{1 + k_r}$$

Questo valore di impedenza si può introdurre nelle relazioni (I-32) ed (I-33) che danno il valore della pressione e della velocità in un condotto a sezione costante, cioè nel caso di onde piane.

Se $\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2$ è $\frac{v_r}{v_i} = k_r = 1$ e $\frac{p_r}{p_i} = -k_r = -1$;

cioè la sorgente immagine, speculare della sorgente effettiva rispetto al piano di separazione dei due mezzi, è in fase colla sorgente effettiva per quanto riguarda la velocità, ed in opposizione di fase per quanto riguarda alla pressione.

Sul piano di separazione vi è circa raddoppiamento di velocità e circa annullamento delle pressione, e l'impedenza $\bar{z} = 0$. Si realizzano le condizioni di risonanza allorchè il condotto è alimentato all'altro estremo un generatore di pressione ed è lungo un multiplo dispari di $\lambda/4$.

Se invece è $\rho_1 c_1 \ll \rho_2 c_2$, è $\frac{v_r}{v_i} = k_r = -1$, e

$\frac{p_r}{p_i} = -k_r = 1$; la sorgente immagine è in fase con la sorgente effettiva per quanto riguarda la pressione ed in opposizione di fase per la velocità.

Sul piano di separazione dei due mezzi vi è circa raddoppiamento di pressione e

e circa annullamento di velocità; l'impedenza $= \infty$. Si ottengono le condizioni di risonanza allorchè il condotto, alimentato all'altro estremo con un generatore di pressione, è lungo un multiplo pari di quarti di lunghezza d'onda.

§7) - Propagazione dei suoni in un condotto disuniforme.

Si consideri un condotto di pareti rigide e di sezione $S = S(x)$ variabile in funzione dell'ascissa x (fig.8),

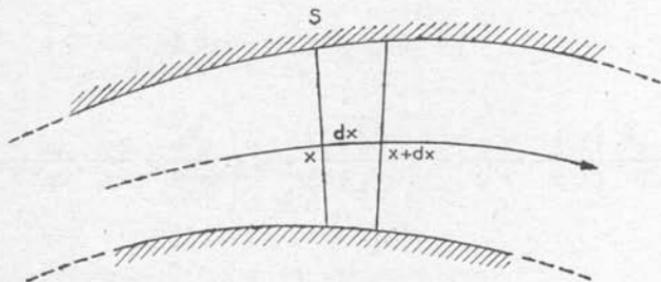


fig.8

e si scriva l'equazione di continuità per la massa di fluido contenuta nel cilindro elementare di base S e di altezza dx , posto in corrispondenza della ascissa.

Secondo lo stesso procedimento indicato nel §1, si ottiene:

$$-\frac{\partial(\rho \dot{V} S)}{\partial x} dx = \frac{\partial \rho}{\partial t} S dx ;$$

ma per la (I-2) è:

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial t}, \quad \text{con} \quad \xi = - \frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

quindi:

$$s \frac{ds}{dt} = + \frac{\partial}{\partial x} \left(s \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$$

Ma l'equazione d'equilibrio (I-8) è:

$$\varphi' = c^2 s, \quad \text{od anche} \quad \varphi'' = c^2 \frac{\partial s}{\partial t},$$

quindi

$$s \varphi'' = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(s \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right);$$

$$\varphi'' = \frac{c^2}{s} \left\{ \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + s \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right\} = c^2 \left\{ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\log s) \right\}$$

$$\varphi'' = c^2 \left\{ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} (\log s) \right\} \quad (\text{I-42})$$

Questa è l'equazione di Webster, la quale definisce la propagazione delle perturbazioni acustiche in condotti disuniformi. Noi ci limiteremo a considerare alcuni casi particolari assai importanti, nei quali è possibile integrare l'operazione suddetta.

a) Condotto a profilo conico.

Assumendo per asse della ascissa l'asse del cono e per origine il vertice di questo, la $S = S(x)$ assume la forma (fig.9)

$$S = \Omega x^2$$

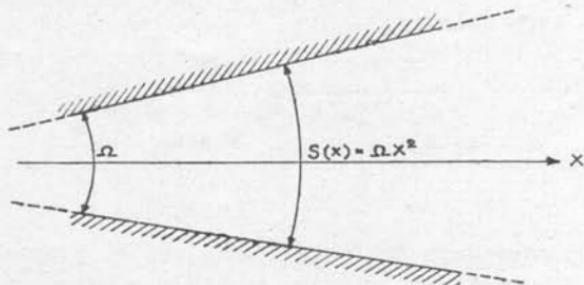


fig.9

ove Ω è l'angolo solido del cono.

Si ha allora:

$$\frac{\partial (\log S)}{\partial x} = \frac{2}{x},$$

e l'equazione di Webster si può scrivere:

$$c^2 \left\{ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right\} = \psi''$$

Questa equazione, che si può mettere sotto questa forma:

$$c^2 \frac{\partial^2 (x\psi)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 (x\psi)}{\partial t^2}$$

la quale differisce da quella delle onde piane per avere

($x\psi$) al posto di ψ .

Si avrà quindi:

$$x\psi = A e^{j\omega(t - \frac{x}{c})} + B e^{j\omega(t + \frac{x}{c})}$$

Si considera soltanto l'onda che si propaga nel senso delle x crescenti, ciò che equivale a supporre il condotto praticamente indefinito e quindi privo di riflessione alla bocca, si ha:

$$\psi = \frac{A}{x} e^{j\omega(t - \frac{x}{c})} \quad (I-43)$$

Se la sorgente sonora di superficie $S = \Omega x_0$ è posta alla coordinata x_0 , il flusso $\dot{\Phi}_v$ della velocità v_0 è:

$$\dot{\Phi}_v = S_0 \xi_0'$$

La velocità degli elementi del mezzo è:

$$\xi' = - \frac{\partial \psi}{\partial x} = A \left\{ \frac{1}{x^2} + \frac{j\omega}{xc} \right\} e^{j\omega(t - \frac{x}{c})}$$

e quindi l'ampiezza del flusso di velocità $\dot{\Phi}_v$, per $x=x_0$, è:

$$\dot{\Phi}_v = \Omega x_0^2 \xi_0' = A \Omega \left(1 + j \frac{\omega x_0}{c} \right) ;$$

da cui si ricava il valore della costante:

Assumendo che la sorgente sia considerata da Φ_v

$$A = \frac{\Phi_v}{\Omega} \frac{1 - j \frac{\omega x_0}{c}}{1 + \frac{\omega^2 x_0^2}{c^2}}$$

Determinata così la costante A per mezzo con le condizioni alla sorgente, si possono scrivere le espressioni della funzione potenziale φ e della pressione p :

$$\varphi = \frac{\Phi_v}{\Omega x} \frac{1 + j \frac{\omega x_0}{c}}{1 + \frac{\omega^2 x_0^2}{c^2}} e^{j\omega(t - \frac{x}{c})}$$

$$p = \rho \varphi' = \rho \frac{\Phi_v}{\Omega x} \frac{j\omega - \frac{\omega^2 x_0}{c}}{1 + \frac{\omega^2 x_0^2}{c^2}} e^{j\omega(t - \frac{x}{c})}$$

Il valore massimo p_{\max} della pressione è:

$$p_{\max} = \frac{\Phi_v \omega \rho}{\Omega x} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\omega^2 x_0^2}{c^2}}}$$

e quindi trattandosi di una onda sferica la potenza media che transita attraverso l'unità di superficie, ossia la

la potenza specifica, risulta:

$$P_s = \frac{p_{\max}^2}{2 \rho c} = \frac{1}{2} \frac{\Phi_v^2 \rho c}{\Omega^2 x_0^2} \cdot \frac{1}{\frac{c^2}{\omega^2 x_0^2} + 1} = \frac{1}{2} \frac{\Phi_v^2 \rho c}{S S_0} \frac{1}{\frac{c^2}{\omega^2 x_0^2} + 1}$$

e la potenza totale che transita attraverso una sezione è:

$$P = P_s S = \frac{1}{2} \frac{\Phi_v^2 \rho c}{S_0} \frac{1}{1 + \frac{c^2}{\omega^2 x_0^2}}$$

se $\frac{c^2}{\omega^2 x_0^2} \ll 1$ ossia se $\frac{c}{x_0 \omega} \ll 1$ e quindi $f \gg \frac{c}{2\pi x_0}$

il secondo termine si può trascurare e si ha:

$$P = \frac{1}{2} \frac{\Phi_v^2 \rho c}{S_0} \quad (\text{I-44})$$

Se invece $\frac{c^2}{\omega^2 x_0^2} \gg 1$ ossia $f \ll \frac{c}{2\pi x_0}$ si ha:

$$P = \frac{1}{2} \frac{\Phi_v^2 \rho c}{S_0} \frac{x_0^2 \omega^2}{c^2} \quad (\text{I-45})$$

e la potenza che transita diminuisce col diminuire della frequenza tendendo a zero con questa.

Il grafico di fig.10 mette in evidenza la variazione della potenza sonora che transita in un condotto a sezione conica al variare della frequenza; qualora la funzione potenziale ora definita dalla (I-42).

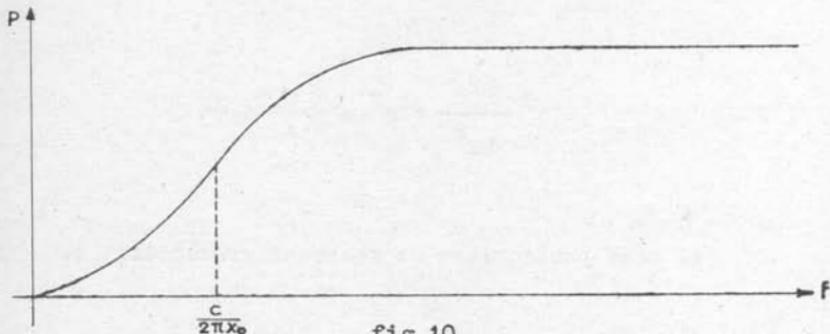


fig.10

b) condotto a profilo esponenziale.

Se si pone (fig.11):

$$S = S_0 e^{mx}$$

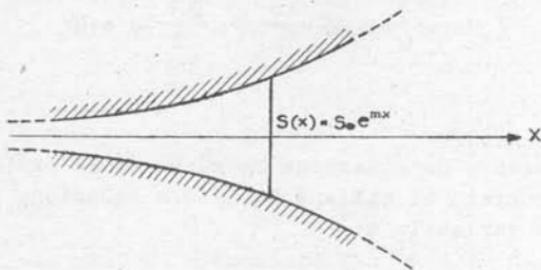


fig.11

e si assume lo stesso sistema di assi coordinati del caso precedente si ha:

$$\frac{\partial (\log S)}{\partial x} = m$$

e l'equazione di Webster si scrive:

$$c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + c^2 m \frac{\partial \psi}{\partial x} = \psi'' .$$

Nel caso particolare di fenomeni sinusoidali è:

$$\psi'' = -\omega^2 \psi$$

e quindi:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + m \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\omega^2}{c^2} \psi = 0 \quad (\text{I-46})$$

Questa è un'equazione omogenea di 2° ordine e l'integrale generale si ottiene dalla sua equazione caratteristica nella variabile z :

$$z^2 + mz + \frac{\omega^2}{c^2} = 0$$

Le due soluzioni sono:

$$\begin{cases} z_1 = -\frac{m}{2} + j \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{m^2}{4}} = -\alpha + j\beta \\ z_2 = -\frac{m}{2} - j \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{m^2}{4}} = -\alpha - j\beta \end{cases} \quad (\text{I-47})$$

in cui:

$$\alpha^2 + \beta^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (\text{I-48})$$

Integrali particolari della (I-46) sono perciò:

$$\varphi_1 = e^{(-\alpha + j\beta)x} \qquad \varphi_2 = e^{(-\alpha - j\beta)x}$$

e quindi l'integrale generale φ_0 è una combinazione lineare con due costanti A e B dei due integrali particolari. Le due costanti sono determinate dalle condizioni ai limiti (alla gola ed alla bocca della tromba)

$$\varphi_0 = A e^{(-\alpha - j\beta)x} + B e^{(-\alpha + j\beta)x}$$

e, ricordando che φ è funzione sinusoidale del tempo:

$$\varphi = \varphi_0 e^{j\omega t} = e^{-\alpha x} [A e^{-j\beta x} + B e^{j\beta x}] e^{j\omega t}$$

od anche, in forma cartesianat

$$\varphi = e^{-\alpha x} \left\{ A \cos (\omega t - \beta x) + B \cos (\omega t + \beta x) \right\} .$$

I due termini entro parentesi rappresentano due onde sonore in moto nelle due direzioni, mentre il termine esponenziale indica che l'ampiezza della oscillazione diminuisce all'aumentare dell'ascissa x .

Se l'onda sonora si propaga soltanto dalla sezione S_0 nell'origine delle ascisse, nella direzione delle ascisse crescenti, e perciò delle sezioni crescenti, non esiste il secondo termine dell'espressione di φ , cioè $B = 0$ e la funzione potenziale diviene semplicemente:

$$\varphi = A e^{-\alpha x} \cos (\omega t - \beta x) , \quad (I-49)$$

in altre parole ciò significa che il condotto è illimitato poiché non si genera onda riflessa.

Il fattore di attenuazione $e^{-\alpha x}$ è dello stesso tipo di quello dovuto agli attriti, ma in questo caso la diminuzione dell'intensità del suono è dovuta non alla viscosità, che si è trascurata, ma alla diminuzione di pressione in conseguenza della divergenza dell'onda sonora in un condotto di sezione sempre crescente.

Il risultato dell'attenuazione è che non solo si produce una diminuzione di ampiezza ma anche una variazione nella velocità di propagazione. In genere la velocità di fase nei fenomeni definiti da relazioni del tipo (I-46) è :

$$c' = \frac{\omega}{\beta}$$

e per la (I-47) :

$$c' = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{m^2}{4}}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{m^2 c^2}{4 \omega^2}}}$$

Risulta cioè per $f > \frac{mc}{4\pi}$ una velocità di fase è maggiore di c , che tende all'infinito per $\frac{mc}{2\omega} \rightarrow 1$; ossia per $f \rightarrow \frac{mc}{4\pi}$, c' diviene immaginario quando $\frac{mc}{2\omega} > 1$ ossia quando $f < \frac{mc}{2\pi}$. *con un s. p. p. recente*

Il potenziale di velocità ha perciò un andamento che è in anticipo su quello di un'onda piana senza dissipazione.

Ricavando la ϕ' e la p si troverebbe anche che queste non sono più in fase fra loro.

Consideriamo ora il caso particolare in cui la velocità nella origine delle coordinate in cui si suppone la sorgente sonora, ad esempio un pistone vibrante, sia data da una espressione del tipo:

$$\frac{\phi_v}{x=0} = \frac{\phi_v}{S_0} \cos \omega t$$

con $\frac{\phi_v}{S_0}$ una costante qualsiasi che indica l'ampiezza della velocità.

E' facile controllare che il potenziale di velocità relativo al moto degli elementi del mezzo provocato da questa sorgente deve essere:

$$\varphi = c^2 \frac{\Phi_v e^{-ax}}{S_0 \omega^2} \left\{ a \cos(\omega t - \beta x) + \beta \sin(\omega t - \beta x) \right\} .$$

La velocità e la pressione dell'ascissa generica x è:

$$\xi' = - \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\Phi_v e^{-ax}}{S_0} \cos(\omega t - \beta x)$$

$$p = \rho \varphi' = \frac{\rho \Phi_v c^2 e^{-ax}}{S_0 \omega} \left\{ -a \sin(\omega t - \beta x) + \beta \cos(\omega t - \beta x) \right\} .$$

La potenza media che transita attraverso l'unità di su perficie, cioè la potenza specifica:

$$P_s = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} p \xi' dt$$

ove T è il periodo od un suo multiplo.

Ossia:

$$P_s = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} \rho \frac{\Phi_v^2 c^2}{S_0^2 \omega} e^{-2ax} \left\{ -a \sin(\omega t - \beta x) \cos(\omega t - \beta x) + \beta \cos^2(\omega t - \beta x) \right\} dt .$$

Tenendo conto che l'integrale del primo termine entro parentesi esteso ad un multiplo del periodo è zero si ha:

$$P_s = \rho\beta \frac{\phi^2 v c^2}{S_o^2 \omega} e^{-2ax} \frac{1}{T} \int_{t_o}^{t_o+T} \cos^2(\omega t - \beta x) dt = \rho\beta \frac{\phi^2 v c^2}{S_o^2 \omega} \frac{e^{-2ax}}{2} .$$

Ricordando che $e^{2ax} = e^{mx} = \frac{S_o}{S}$, e sostituendo a β il suo valore (I-47), si può scrivere:

$$P_s = \rho c \frac{\phi^2 v}{2SS_o} \sqrt{1 - \frac{m^2 c^2}{4\omega^2}} .$$

Non potendo il radicando divenire negativo, la potenza media che transita nella tromba infinita è nulla, se:

$$\frac{m^2 c^2}{4\omega^2} \geq 1$$

cioè se:

$$\omega \leq \frac{mc}{2} , \text{ o anche } f \leq \frac{mc}{4\pi} \quad (\text{I-50})$$

Da ciò si vede che la tromba nei riguardi della propagazione si comporta come un filtro passa alto avente frequenza di taglio $f_0 = \frac{mc}{4\pi}$ e che il valore di f_0 dipende solo da m cioè dal parametro che definisce l'andamento esponenziale della tromba.

La trattazione, che si potrebbe analogamente svolgere per trombe aventi altri andamenti, permetterebbe di determinare che questa proprietà compete anche ad altri andamenti oltre l'esponenziale. In funzione delle frequenze le potenze specifiche che transitano nella sezione S di una tromba conica, di una esponenziale, di una parabolica e di una iperbolica, le quali hanno uguali ed ugualmente distanti le sezioni S_0 ed S , sono indicate in figura 12.

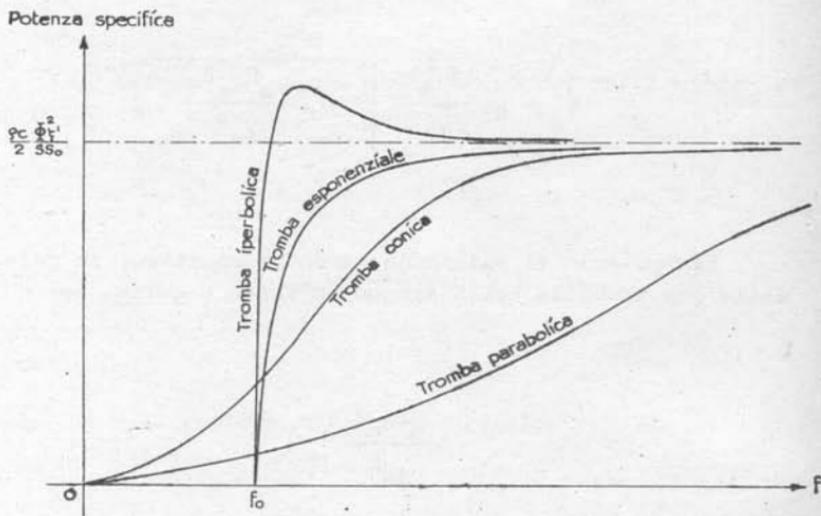


fig.12

Se il condotto non è illimitato, come si è finora supposto, ma invece è di lunghezza finita, vuol dire che nella sezione in cui esiste la variazione di mezzo, si produ-

ce una riflessione e quindi nasce una onda che si propaga in senso opposte. In tal caso $B \neq 0$ e la condizione al contorno, cioè il modo con cui termina il condotto considerato, permette di ricavare il valore della seconda costante.

Nel caso di fronte esponenziale, se essa termina in un ambiente indefinito, da un calcolo esatto si ricava che la riflessione nella sezione terminale può praticamente trascurarsi ($< 10 \%$) se la tangente al contorno fa un angolo

$\geq \frac{\pi}{4}$ con l'asse delle ascisse. Se non vi è riflessione apprezzabile, vuol dire che tutta la potenza sonora si trasmette nell'ambiente. Con semplici sostituzioni si vede che la condizione limite $\frac{dr}{dx} = \frac{\pi}{4}$ corrisponde ad avere un diametro

esterno della bocca $\geq \lambda_0/4$ in cui $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$.

Per rendere meno ingombranti le trombe, che in base alle condizioni ora poste risultano talvolta molto lunghe, si può arrotondare la parte sottile, accorgimento usato in alcuni strumenti musicali, oppure si ricorre alle trombe "Reflex" (fig. 13). Esse sono costruite in modo che la sezione, pur

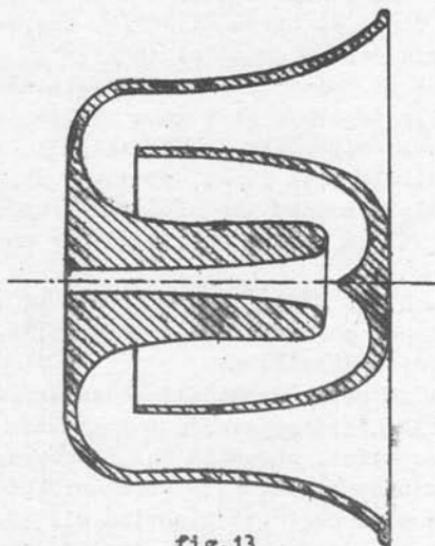


fig. 13

essendo nel secondo a terzo tratto di forma anulare, cresce sempre con legge esponenziale e che siano rispettate le condizioni di minima riflessione nella sezione terminale.

Pur tuttavia nei casi reali è noto che un suono viene emesso da una tromba anche quando la frequenza è minore di quella di taglio. Ciò è dovuto al fatto che la tromba reale, non essendo infinita, e la potenza radiata, anche per frequenze inferiori a quella di taglio, può essere diversa da zero.

Può essere determinata sia per via analitica sia per via sperimentale la potenza specifica da una tromba esponenziale di lunghezza finita, e, per effetto delle parziali riflessioni che si producono sulla bocca, tale potenza ha sempre, in funzione della frequenza un andamento fluttuante con escursioni tanto meno marcate e più raffinate quanto più la tromba è lunga. Ad esempio in fig. 14 è riportato tale andamento in un caso reale da tromba avente il diametro della gola di 2,5 cm. il diametro della bocca 0,75 m., e lunga m. 1,85. Le fluttuazioni di potenza specifica emessa sono ancora del 25 %/o, ma basta allungare la tromba di una quindicina di centimetri, e perciò il diametro della bocca di circa il 30 %/o, che le fluttuazioni di potenza si riducono a meno del 10 %/o.

L'andamento della componente reale della impedenza di ingresso della tromba è analogo a quello della potenza specifica radiata, riportata in fig. 14.

E' possibile, con forme opportune di condotto, attuare una propagazione sonora che abbia la proprietà di lasciare passare la potenza sonora con leggi che sono funzioni della frequenza.

Dopo quanto è stato stabilito al § 4, è facile vedere a cosa può farsi corrispondere, in acustica, alla induttanza ed alla capacità elettrica.

Per quanto siano possibili molte analogie tra fenomeni elettrici quelli meccanici, normalmente ci si riferisce nei filtri acustici, a quella che fa corrispondere la forza alla tensione, la velocità alla corrente, la massa all'induttanza e la costante elastica all'inverso della capacità, cioè a quella analogia elettro meccanica, (vedi capitolo seguente) che differisce dall'analogia elettro acusti-

ca già citata (§ 4), solo perchè manca nelle grandezze meccaniche il fattore: superficie.

La massa $m = \rho l S$ del mezzo contenuto in un canolino di sezione S e lunghezza l , che, per le piccole dimensioni si possa considerare in moto rigido, corrisponde alla induttanza L ; la costante di elasticità h che risulta comprimendo o decomprimendo con un pistone attraverso un collo di sezione S il mezzo contenuto in un volume V , corrisponde all'inverso della capacità $\frac{1}{C}$.

Poichè la costante elastica h è, per definizione, il rapporto tra forza F e deformazione ϕ (fig.15), si ha subito, ricordando (§ 2) il significato del coefficiente di compressibilità ϵ :

$$h = \frac{F}{\phi} = \frac{p S^2}{\frac{S \phi}{V}} = \frac{\epsilon S^2}{V} .$$

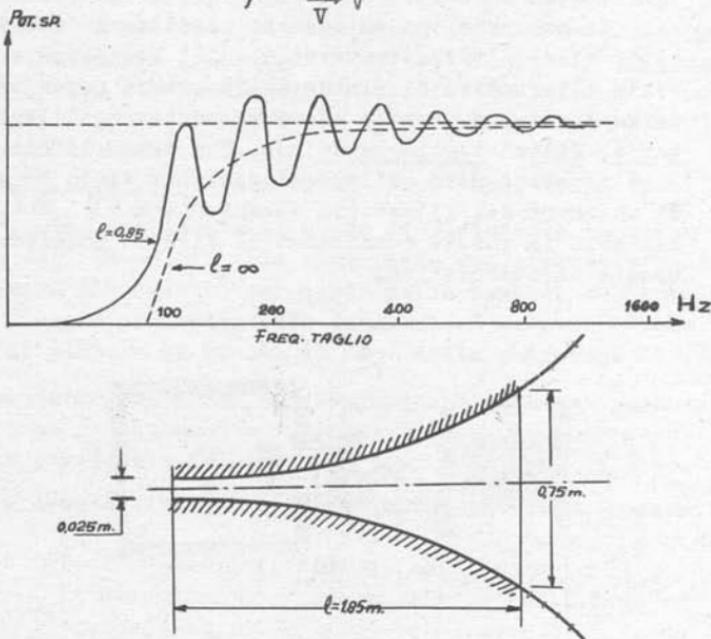


fig.14

Un filtro passa-basso si ottiene, ad esempio connettendo masse ed elasticità come in fig. 16. Analogamente al filtro elettrico la frequenza di taglio è:

$$f_t = \frac{1}{\pi \sqrt{L C}} = \frac{1}{\pi \sqrt{m/h}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\epsilon S}{\rho V l}} = \frac{c}{\pi} \sqrt{\frac{S}{V l}} \quad (I-51)$$

Secondo questo concetto sono costruiti i silenziatori (marmitte), cioè quei condotti che lasciano passare una corrente continua di fluido, ma non una corrente alternativa di frequenza superiore ad un certo limite, che costituirebbe un suono.

In modo analogo si possono realizzare filtri passa-alto, cioè filtri attraverso i quali può passare una corrente alternativa di fluido di frequenza superiore ed un certo limite, ma non la corrente continua, filtri passa-banda, filtri taglia-banda ecc.. Una certa difficoltà pratica consiste però nella realizzazione della resistenza R di chiusura del filtro (ad esempio: $\sqrt{m h} = \sqrt{S \frac{\rho \epsilon l}{V}}$) poiché solo in queste condizioni il filtro possiede la sua usuale caratteristica.

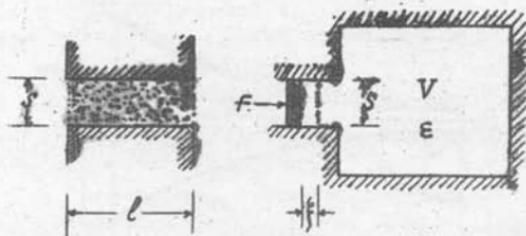


fig. 15

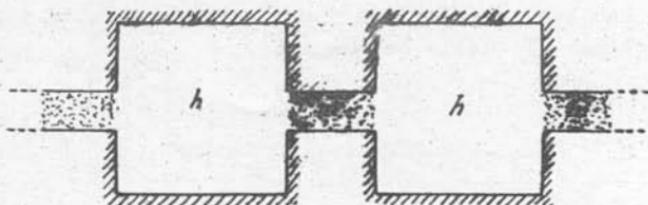


fig.16

§7) - Adattamento di impedenze acustiche.

Poichè la resistenza acustica specifica ρc dell'aria è molto minore della impedenza specifica che si oppone alla vibrazione di un pistone, il rendimento della trasformazione di energia meccanica in energia acustica è sempre assai basso. E' possibile, con un semplice accorgimento pratico, effettuare un adattamento di impedenza tale da aumentare notevolmente il rendimento.

Sia S_2 (fig.17) la sezione di un condotto indefinito a pareti rigide contenente il mezzo di resistenza acustica specifica ρc ed $S_1 > S_2$ la superficie del pistone vibrante, collegato al condotto² per mezzo della camera V di spessore d piccolo di fronte alle lunghezze d'onda in giuoco.

Se il pistone si sposta di ξ_1 dalla posizione di riposo, ammettendo, in prima approssimazione, il mezzo racchiuso in V come assolutamente incompressibile; lo spostamento ξ_2 delle particelle del mezzo in corrispondenza dell'orifizio deve essere tale da spostare lo stesso volume, cioè:

$$\xi_1 S_1 = \xi_2 S_2$$

Inoltre la pressione p , uguale in tutti i punti del del volume V della camera è:

$$p = \frac{1}{2} \rho c$$

Indicando con z l'impedenza specifica di radiazione opposta dal mezzo alla vibrazione del pistone, si può scrivere:

$$z = \frac{p}{v_1}$$

Se la vibrazione del pistone è sinusoidale a regime, si

ha: $\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2}{v_1}$ da cui:

$$v_1 = v_2 \cdot \frac{S_2}{S_1}$$

e quindi:

$$z = \rho c \frac{v_2}{v_1} = \rho c \frac{S_1}{S_2} \quad (I-52)$$

L'impedenza specifica di radiazione sotto cui vibra il pistone è maggiore di quella del mezzo libero, nel rapporto S_1/S_2 .

Non si deve però credere che si possa dare al rapporto S_1/S_2 valori elevatissimi.

S_2 infatti non può essere troppo piccolo altrimenti

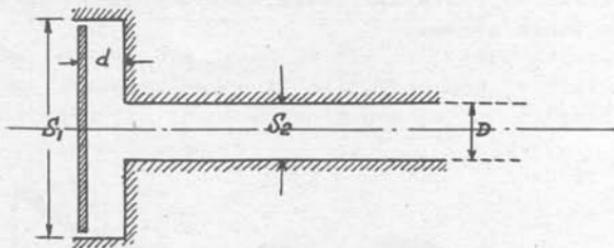


fig.17

lo spostamento ξ_2 assume valori così elevati da aumentare intollerabilmente le perdite per attrito sulle superfici laterali del condotto. S_1 , non può essere per contro troppo elevato per non dar luogo a vibrazioni di parti della membrana in opposizione di fase (separate da linee nodali) con conseguente diminuzione della potenza radiata.

In pratica in aria S_2 non può essere inferiore all'ordine di grandezza del centimetro quadrato ed S_1 non può essere oltre il centinaio di centimetri quadri. Perciò la γ può al massimo raggiungere 100 ÷ 200 volte la resistenza acustica specifica del mezzo libero ρc .

Se il condotto è di lunghezza finita e sbocca nel mezzo libero, si hanno fenomeni di risonanza alle frequenze in cui la lunghezza del condotto è multipla dispari di $\lambda/4$ e, se D è assai minore di λ solo una parte della potenza immessa nel condotto, come si vedrà nel prossimo paragrafo, si diffonde nel mezzo libero, la parte rimanente della potenza che avanza entro il condotto si riflette all'apertura e ritorna indietro dando luogo a fenomeni di onde stazionarie e di risonanza. Per evitare questo fenomeno e far sì che praticamente tutta la potenza venga erogata nel mezzo libero, occorre sostituire al condotto cilindrico un condotto esponenziale il quale adatti gradualmente l'onda sonora in sezioni sempre più ampie fino a confondersi col mezzo libero, purchè il diametro D della bocca non sia inferiore alla lunghezza di onda $\lambda/4$ e quindi non dia luogo a ri-

flessioni apprezzabili dell'onda sonora in corrispondenza della bocca stessa.

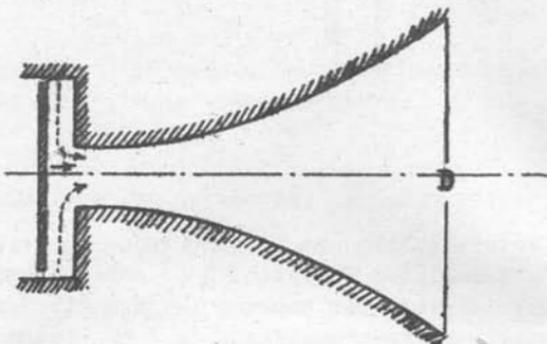


fig.18

Dalla fig.18 si vede che le distanze dei vari punti del pistone vibrante dal foro centrale sono notevolmente diverse; le onde sonore arrivano perciò all'imboccatura della tromba con una differenza di fase che abbassa il rendimento della trasformazione. Per limitare tale inconveniente si sostituisce un foro anulare a quello centrale, equidistante dal centro e di bordi del pistone, opportunamente raccordato con la tromba (fig.19).

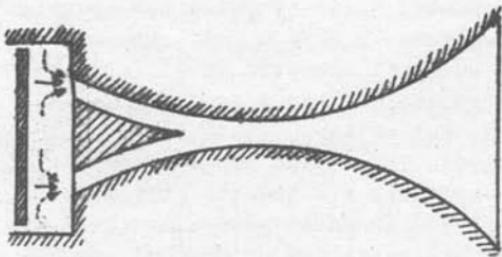


fig.19

§8) - Vibrazione di un pistone rigido.

Si ricorda che nello studio del campo sonoro generato da una sfera pulsante si è trovato che la funzione potenziale di velocità in un punto generico P distante r dal centro della sfera è:

$$\psi = \frac{\dot{\phi}_v}{4\pi r} \cos(\omega t - kr) = \frac{\dot{\phi}_v}{4\pi r} e^{j(\omega t - kr)}, \quad (I-52)$$

in cui $k = \frac{\omega}{c}$ e $\dot{\phi}_v$ è l'ampiezza del flusso di velocità alla sorgente sonora; cioè $\dot{\phi}_v = \xi'_0 S$, essendo ξ'_0 è la ampiezza della velocità dei punti della sfera pulsante di superficie S.

Si consideri ora un pistone piano, vibrante con legge sinusoidale normalmente al suo piano, affacciato ad una parete piana indefinita e rigida (fig.20), rispetto alla quale uno solo dei semispazi sia occupato dal mezzo di resistenza acustica ρc , e l'altro semispazio sia vuoto.

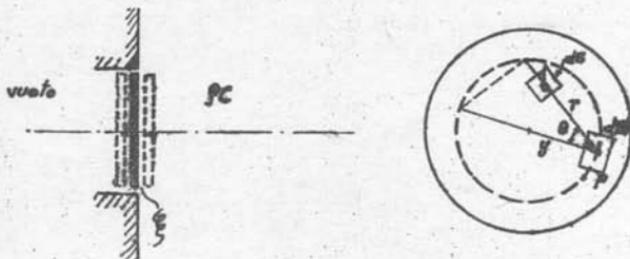


fig.20

Ogni elemento dS della superficie del pistone, vi-
 PAOLINI - Acustica ed Elettroacustica.....9

brante con ampiezza di velocità ξ'_0 , si potrà approssimativamente considerare equivalente ad una semisferetta elementare pulsante; quindi:

$$\left| \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right| = 2 \xi'_0 \int dS ;$$

e la funzione potenziale $d\varphi$ relativa al suono emesso dal moto dell'elemento dS che investe i punti a distanza r da dS stesso, diviene per la (I-52):

$$d\varphi = \frac{\xi'_0 e^{j\omega t}}{2\pi} \cdot \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot dS .$$

Se il pistone è circolare ed il punto P è sulla superficie stessa del pistone, la funzione potenziale relativa alla vibrazione di tutta la superficie S del pistone è:

$$\varphi = \int_S d\varphi = \frac{\xi'_0}{2\pi} e^{j\omega t} \int_S \frac{e^{-jkr}}{r} dS$$

$$p = \rho \varphi' = \frac{j\rho\omega \xi'_0 e^{j\omega t}}{2\pi} \int_S \frac{dS}{r} e^{-jkr}$$

Indicando con dS_1 l'area elementare dell'intorno di P , la forza totale agente sulla superficie del pistone è:

$$F = \int_S p \, dS_1 = \frac{j\omega\rho_0 \int_0^y e^{j\omega t}}{2\pi} \int_S dS_1 \int_S \frac{dS}{r} e^{-jkr} .$$

L'effetto della vibrazione di dS_1 su dS è lo stesso dell'effetto della vibrazione di dS su dS_1 , quindi il risultante dell'integrazione risulta il doppio di quello che si avrebbe se dS e dS' fossero presi una sola volta. La cosa si semplifica moltiplicando le quantità da integrare per 2 e facendo l'integrazione in modo che ciascuna coppia di elementi venga calcolata una sola volta. Ciò può ottenersi integrando rispetto a dS nella sola porzione di area S' interna al cerchio di raggio y . Indicando con V il secondo integrale, si ha:

$$V = \int_{S'} \frac{dS}{r} e^{-jkr} = \int_{S'} \frac{r dr \, d\theta}{r} e^{-jkr} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^{2y \cos \theta} e^{-jkr} dr =$$

$$= 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^{2y \cos \theta} e^{-jkr} dr = -\frac{2}{jk} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (e^{-j2ky \cos \theta} - 1) d\theta =$$

$$= \frac{\pi}{jk} + \frac{2j}{k} \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-j2ky \cos \theta} \cdot d\theta ;$$

ed eseguendo l'integrazione indicata termine a termine dello sviluppo in serie di potenza, ricordando che:

$$e^{-jz} = \cos z - j \sin z = 1 - \frac{z^2}{2} + \frac{z^4}{4!} - \frac{z^6}{6!} + \dots$$

$$-j \left(z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{5} - \frac{z^7}{7} + \dots \right)$$

in cui: $z = 2ky \cos \theta$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-j2ky \cos \theta} d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta - \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (2ky \cos \theta)^2 d\theta + \frac{1}{4!} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (2ky \cos \theta)^4 d\theta + \dots$$

$$-j \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2ky \cos \theta d\theta - \frac{1}{3!} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (2ky \cos \theta)^3 d\theta + \frac{1}{6!} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (2ky \cos \theta)^5 d\theta + \dots \right\}$$

Inoltre tenendo pure presente che:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n \theta d\theta = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (n-1)}{2 \cdot 4 \dots n} \frac{\pi}{2}, \text{ se } n \text{ è pari è}$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n \theta d\theta = \frac{2 \cdot 4 \cdot 6 \dots (n-1)}{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots n} \frac{\pi}{2}, \text{ se } n \text{ è dispa}$$

ri si ottiene:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-j2ky \cos \theta} d\theta = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{2^2} (2ky)^2 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \frac{1}{4!} (2ky)^4 + \dots \right\} -$$

$$- j \left\{ 2ky - \frac{2}{2} \frac{1}{3!} (2ky)^3 + \dots \right\}$$

La prima parentesi indica lo sviluppo della funzione di Bessel di prima specie e di ordine zero $J_0(2ky)$ e la seconda parentesi la funzione di ordine zero di Rayleigh $K(2ky)$ moltiplicata per $\frac{\pi}{2}$; si ha perciò:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-j2ky \cos \theta} d\theta = \frac{\pi}{2} \left\{ J_0(2ky) - jK_0(2ky) \right\}$$

da cui:

$$V = \frac{\pi}{k} \left\{ K_0(2ky) - j \left[1 - J_0(2ky) \right] \right\}.$$

Quindi la forza totale risulta:

$$F = \frac{j\omega\rho \int_0^b \zeta_0 e^{j\omega t}}{2z} \frac{\pi}{k} \int_S \left\{ K_0(2ky) - j \left[1 - J_0(2ky) \right] \right\} dS_1.$$

essendo l'elemento di superficie dS_1 , per ragioni di simmetria, considerato di forma anulare nel cui interno si trovi il punto P, cioè: $dS_1 = 2\pi y dy$. Quindi se R è il raggio del pistone, come si è detto, raddoppiando i valori ottenuti dall'integrazione, si ha:

$$F = \frac{j\omega\rho\zeta'_0 e^{j\omega t}}{k} \int_0^R 2\pi y \left\{ K_0(2ky) - j \left[1 - J_0(2ky) \right] \right\} dy ,$$

e ricordando che tra le funzioni di Bessel di ordine zero ed uno e quelle di Rayleigh esiste la relazione:

$$\int J_0(z) z dz = z J_1(z)$$

$$\int K_0(z) z dz = K_1(z)$$

si ottiene:

$$F = j\omega\rho\pi \zeta'_0 e^{j\omega t} \left\{ \frac{1}{2k^3} K_1(2kR) - j \frac{R^2}{k} \left(1 - \frac{J_1(2kR)}{kR} \right) \right\} .$$

Ricordando che $\omega = kc$, l'impedenza Z offerta dal mezzo alla vibrazione del pistone è il modulo del rapporto tra la forza F e la velocità $\zeta'_0 e^{j\omega t}$.

$$Z = \left| \int_0^1 e^{j\omega t} dt \right| = \pi R^2 \rho c \left[1 - \frac{J_1(2kR)}{kR} \right] + j \frac{\omega \rho \pi}{2k^2} K_1(2kR);$$

in cui:

$$J_1(2kR) = kR \left\{ 1 - \frac{(2kR)^2}{2 \cdot 2!} + \frac{(2kR)^4}{2 \cdot 4 \cdot 2^2 \cdot 6} \dots \dots \dots \right\} \quad (I-53)$$

$$K_1(2kR) = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{(2kR)^3}{3!} - \frac{(2kR)^5}{3^2 \cdot 5} + \dots \dots \dots \right\} \quad (I-54)$$

od anche la Z si può mettere sotto la forma:

$$Z = \rho c \cdot \pi R^2 \cdot \left\{ 1 - \frac{J_1(2kR)}{kR} + j \frac{K_1(2kR)}{2 k^2 R^2} \right\} \quad (I-55)$$

$$= \pi R^2 (A + jB)$$

Se $2kR \ll 1$, cioè per $\lambda \gg 4\pi R$, si può limitare la serie ai soli primi termini:

$$J_1(2kR) \approx kR \left(1 - \frac{(2kR)^2}{8} \right)$$

$$K_1(2kR) \approx \frac{2}{\pi} \frac{(2kR)^3}{3}$$

cioè:

$$Z = \left| \frac{P}{S \cdot j\omega t} \right| = \pi R^2 \rho \left[\frac{k^2 R^2}{2} + j \frac{\omega \rho}{2k^2} \frac{2}{\pi} \frac{2kR}{3} \right]$$

$$Z = \frac{\rho \omega^2 S^2}{2\pi c} + j\omega \rho \frac{8}{3} R^3 \quad (I-56)$$

La Z è perciò complessa del tipo $\alpha + j\omega\beta$ in cui la parte reale α è proporzionale al quadrato della frequenza ed al quadrato della superficie S del pistone; il coefficiente dell'immaginario $\omega\beta$ è una reattanza acustica, circa pari a quella data dai $2/3$ della massa di mezzo contenuta nella sfera di identico raggio:

$j \frac{2}{3} \omega \rho \frac{4\pi R^3}{3}$. La reattanza acustica offerta al moto di una membrana rigida di raggio R è proporzionale al cubo del raggio stesso.

Se la membrana è fisicamente consistente di massa $m = \rho \pi R^2 d$, ove ρ è la densità del materiale costituente la membrana stessa e d lo spessore, ad essa si deve aggiungere la massa dovuta al mezzo covibrante, che per membrane di raggio sufficientemente grande può uguagliare ed anche molto superare la m stessa.

Le componenti reali α ed immaginarie β è riportato in figura 21.

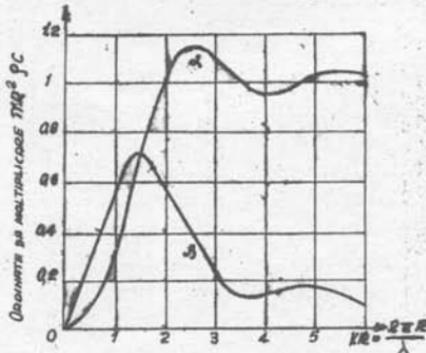


fig.21

Mentre nella sfera pulsante la massima reattanza specifica, cioè per unità di superficie, è, pari a 0,5 pc., nel pistone vibrante la massima reattanza specifica è circa 0,7 pc.

Se il pistone fosse libero nelle spazie, cioè senza parete rigida, il problema sarebbe sostanzialmente diverso, ed i risultati della trattazione ora svolta sarebbero solo una prima grossolana approssimazione.

Nelle applicazioni acustiche ricorrono spesso fenomeni assimilabili al caso classico del pistone vibrante, che appunto per ciò è state qui ripartato.

Se il pistone emette un'onda sonora dalle due parti nello stesso mezzo di resistenza pc il valore dell'impedenza deve essere raddoppiata, purchè naturalmente sussista la parete rigida indefinita di divisione tra i due semispazi alla quale il pistone stesso è affacciato.

Le due onde sonore hanno opposizione di fase e quindi la parete rigida è indispensabile per evitare fenomeni di interferenza. Se la parete pur essendo rigida, non è indefinita, nasce una interferenza tra i suoni emessi dalle due parti, tanto più importante quante più la lunghezza d'onda risulta non trascurabile di fronte alle dimensioni geometriche della parete (che prende il nome di "baffle").

Non si considerano qui le proprietà direttiva che sorgono dalla vibrazione del pistone rigido affacciato a parete indefinita perchè verranno trattate in seguito.

ooooo

ooo.

oo

o

Cap. II

VIBRAZIONI MECCANICHE



1) - Oscillazioni forzate. -

L'analogia tra fenomeni acustici ed elettrici vista nel capitolo precedente può essere completata con una seconda analogia tra fenomeni meccanici ed elettrici che, in
sieme alla prima, permette di studiare le vibrazioni acustico-meccaniche con le stesse leggi e gli stessi sistemi di calcolo che si usano nella trattazione dei circuiti elettrici sottoposti a fenomeni alternativi.

*Indubbiamente
anche le stesse
leggi si applicano
alle oscillazioni forzate
dei circuiti meccanici
e delle autoimpedenze*

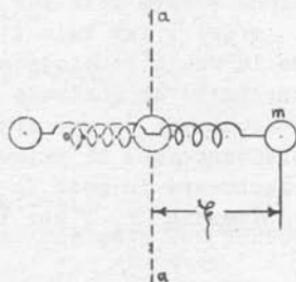


fig.22

Una verifica semplice di questa analogia può essere mostrata dal caso seguente. Si abbia una massa puntiforme m (fig.22) capace di spostarsi rispetto ad una posizione

media normalmente alla retta aa segnata in figura.

Si supponga la massa soggetta ad una forza elastica f_e che tenda a riportarla nella posizione di riposo con una intensità proporzionale allo spostamento ξ , tale cioè che:

$$f_e = h \xi$$

dove h è il coefficiente di proporzionalità (costante elastica della legge di Hookes). Si suppone poi che lo spostamento avvenga in un mezzo resistente, tale che la massa m debba, per muoversi, vincere una forza resistente di attrito f_r proporzionale alla velocità ξ' cioè:

$$f_r = a \xi'$$

dove a è il coefficiente di proporzionalità.

Questa relazione è vera solo per velocità modeste fino all'ordine del m/sec ; per velocità maggiori è piuttosto da considerare la resistenza opposta dal mezzo al moto della massa proporzionale al quadrato della velocità. Nei fenomeni acustico-meccanici è, per diverse ragioni, sempre da prendere in considerazione il primo caso.

Infine, per mantenere in moto la massa m , occorre vincere la forza d'inerzia f_i , per la quale è:

$$f_i = m \xi''.$$

Perchè il moto sussista, occorre che la forza f ap-

plicata dall'esterno alla massa, faccia equilibrio alla somma delle tre forze considerate:

$$F = f_i + f_r + f_e .$$

Se la forza F è, per esempio, alternativa sinusoidale della forma $F_0 \cos \omega t$ si deve avere.

$$F_0 \cos \omega t = m \ddot{\xi} + a \dot{\xi} + h \xi \quad (\text{II-1})$$

Si confronti ora questa relazione relativa alla vibrazione meccanica con la relazione che lega la tensione alternativa $V \cos \omega t$, applicata agli estremi di un circuito contenente induttanza, resistenza e capacità in serie (fig. 23), alla caduta di tensione nei singoli elementi del circuito, e cioè:

$$V \cos \omega t = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt; \quad (\text{II-2})$$

dove L , R e C sono rispettivamente induttanza, resistenza e capacità, ed i è la corrente che percorre il circuito.

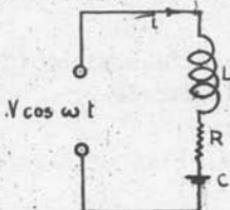


fig. 23

La relazione (II-1) e (II-2) hanno la stessa forma, e si può far corrispondere rispettivamente alla forza F , la tensione V ; alla velocità φ' , la corrente i ; alla massa m , la induttanza L ; alla resistenza di attrito a , la resistenza elettrica; alla costante di elasticità h , l'inverso $1/C$ della capacità.

Questa equivalenza tra grandezze elettriche e meccaniche che non è in contrasto con l'equivalenza già esposta tra grandezze elettriche ed acustiche. Infatti in tal caso, riferendosi alla unità di superficie, alla resistenza elettrica R corrisponde la resistenza acustica specifica ρc , ed alla tensione corrisponde la pressione; in questione alla resistenza elettrica corrisponde la resistenza di attrito a , (che è appunto dimensionalmente una resistenza acustica moltiplicata per una superficie), ed alla tensione corrisponde la forza che è una pressione per una superficie.

Come è noto dall'elettrotecnica la soluzione dell'equazione differenziale (II-2), prescindendo dai fenomeni transitori, a regime è:

$$i = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \cos(\omega t - \varphi)$$

in cui

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{R}{|Z|}$$

Analogamente, per l'equazione (II-1) è, pure prescindendo da fenomeni transitori:

$$\varphi' = \frac{F_0}{\sqrt{a^2 + (\omega m - \frac{h}{\omega})^2}} \cos(\omega t - \varphi) \quad (\text{II-3})$$

in cui:

$$\cos \varphi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + \left(\omega m - \frac{h}{\omega}\right)^2}} \quad (\text{II-4})$$

L'ampiezza di φ raggiunge il massimo valore quando la pulsazione della forza eccitatrice è $\omega_0 = \sqrt{\frac{h}{m}}$ cioè per la frequenza di risonanza $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ analogamente al caso elettrico in cui $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Integrando la (II-3) si ricava:

$$\varphi = \frac{F_0}{\omega \sqrt{a^2 + \left(\omega m - \frac{h}{\omega}\right)^2}} \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (\text{II-5})$$

Se si mettono in conto anche i fenomeni transitori che intervengono a partire dall'istante in cui si applica la forza F , si ottiene la soluzione completa dell'equazione (II-1):

$$\varphi = A e^{-kt} \text{sen}(\omega' t - \psi) + \frac{F_0}{\omega \sqrt{a^2 + \left(\omega m - \frac{h}{\omega}\right)^2}} \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (\text{II-6})$$

in cui $k = \frac{a}{2m}$, $\omega' = \sqrt{\frac{h}{m} - k^2}$, ed A e ψ sono le due costanti di integrazione definite dalle condizioni iniziali.

Il primo termine di questa espressione rappresenta una

sollecitazione "libera smorzata" che è sovrapposta all'oscillazione "forzata" rappresentata dal secondo termine. In virtù del fattore esponenziale, che diminuisce all'aumentare del tempo t , la oscillazione libera gradualmente si estingue, e, dopo un certo tempo t , la oscillazione libera gradualmente si estingue, e, dopo un certo tempo sono apprezzabili solo gli effetti della oscillazione forzata.

Poichè è, in generale, $\frac{h}{m}$ molto grande rispetto a k^2 , si può ammettere:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{h}{m} - k^2} \approx \sqrt{\frac{h}{m}} = \omega_0 = 2\pi f_0.$$

La frequenza f_0 , per la quale si ha il massimo della ampiezza delle oscillazioni forzate, non coincide esattamente, in generale con la frequenza delle oscillazioni libere $f'_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$, leggermente minore della prima.

Trascurando il periodo transitorio, si può ritenere la (II-5) come soluzione della equazione (II-1) per il fenomeno a regime. Questa si può scrivere:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{F_0}{m \sqrt{\frac{4k^2 \omega^2}{4m^2} + (\omega^2 - \frac{h}{m})^2}} \operatorname{sen}(\omega t - \varphi) = \\ &= \frac{F_0}{m \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2}} \operatorname{sen}(\omega t - \varphi). \end{aligned}$$

Il fattore che moltiplica in seno dà l'ampiezza della oscillazione forzata e definisce, in funzione di ω , la curva di risonanza del fenomeno.

In figura 24 è riportata la famiglia di curve che danno questa ampiezza in funzione del parametro $\frac{k}{\omega_0}$; e si è posto uguale ad 1 l'ampiezza della φ per $\omega = 0$; cioè

$$\frac{F_0}{h} = 1.$$

Il parametro $\frac{k}{\omega_0}$ definisce l'acutezza della risonanza. Il massimo di ampiezza di oscillazione si ha per $\omega =$

$= \sqrt{\omega_0^2 - 2k^2}$ ma poichè, come si è detto, nei casi reali k è generalmente piccolo rispetto ad ω_0 , si può ritenere che praticamente il massimo dell'ampiezza di oscillazione si abbia quando la pulsazione ω della forza agente è pari a quella $\omega_0 \approx \omega_0$ delle oscillazioni libere.

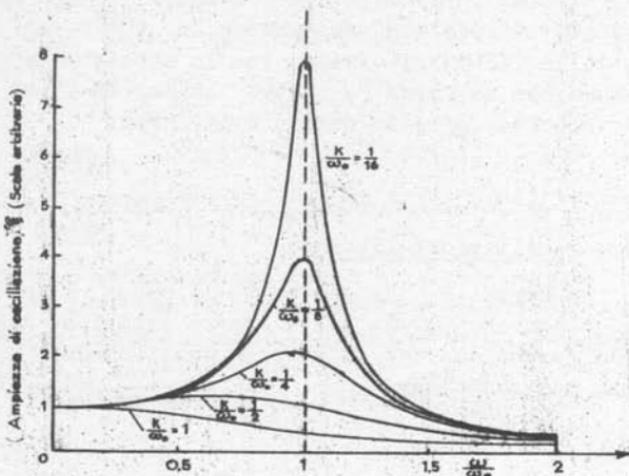


fig.24

Il valore $\frac{k}{\omega_0} \leq 1$; corrisponde al caso di oscillazione periodica. Il minimo valore di a per il quale si

PAOLINI - Acustica ed Elettroacustica 11

ha oscillazione aperiodica. è definito da:

$$(II-7) \quad \frac{k}{\omega_0} = \frac{\frac{a}{2m}}{\frac{h}{m}} = 1, \text{ cioè } a = 2 \sqrt{hm},$$

in tali condizioni il circuito meccanico ha raggiunto lo smorzamento critico.

La (II-4) può anche scriversi:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega}{2k} \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right),$$

dalla quale si vede che per $\omega = \omega_0$ è $\varphi = 0$. Alla risonanza, dalla (II-5) si osserva che lo spostamento φ è in quadratura con la forza F , mentre, dalla (II-3) si osserva che la velocità $\dot{\varphi}$ è in fase con la forza.

§2) - Oscillazioni libere.

Se la forza F che sollecita la massa m cessa di agire, lo spostamento φ deve essere soluzione dell'equazione differenziale che si ottiene sostituendo, nella (II-1), al primo membro lo zero

$$m \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + a \frac{d\varphi}{dt} + h \varphi = 0. \quad (II-8)$$

La soluzione di questa equazione è data evidentemente dal primo termine del secondo membro della (II-6), mentre l'oscillazione forzata, costituita dal secondo termine, im-

provvisamente sparisce allo scomparire della forza agente:

$$\varphi = Ae^{-kt} \operatorname{sen}(\omega_0' t + \psi) \approx Ae^{-kt} \operatorname{sen}(\omega_0 t + \psi) .$$

Le costanti A e ψ sono definite dalle condizioni del moto nell'istante in cui cessa di agire la F .

La (II-8) è l'equazione relativa alle oscillazioni libere cioè quelle che si producono anche quando la massa del sistema meccanico, dopo aver subito uno spostamento di un urto, viene lasciata libera di muoversi.

Queste oscillazioni tendono a smorzarsi se $k \neq 0$, mentre se $k = 0$ (cioè: $a = 0$, o $m \rightarrow \infty$) il moto persiste indefinitamente con la stessa ampiezza A definita dall'impulso iniziale.

Il fattore esponenziale k stabilisce la rapidità dello smorzamento, e, analogamente al caso elettrico, si definisce $\delta = \frac{2rk}{\omega_0}$ il decremento logaritmico dalla oscillazione.

§ 3) - Dissipazione di potenza nelle oscillazioni forzate.

Si può vedere adesso quale è la potenza media P consumata dalla forza F per mantenere in moto la massa m . Per questo basta calcolare il valore medio della potenza, in un numero intero di periodi, del prodotto della forza F per la velocità $\dot{\varphi}$. Per la (II-3) è:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T F \dot{\varphi} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{F_0^2}{\sqrt{a^2 + (\omega m - \frac{h}{\omega})^2}} \cos \omega t (\omega t - \varphi) dt =$$

$$= \frac{F_0^2}{2 \sqrt{a^2 + \left(\omega m - \frac{h}{\omega}\right)^2}} \cos \varphi .$$

Per la (II-4) si ottiene:

$$P = \frac{F_0^2 a}{2 \left[a^2 + \left(\omega m - \frac{h}{\omega}\right)^2 \right]} \quad (II-9)$$

La potenza consumata è funzione della frequenza, ed il suo andamento è indicato in figura.25. A parità di forza agente F_0 , ($\omega = \sqrt{h/m}$) la potenza consumata è massima:

$$P_{\max} = \frac{F_0^2}{2a} \quad (II-10)$$

mentre al di fuori della frequenza di risonanza la potenza consumata tende asintoticamente a zero.

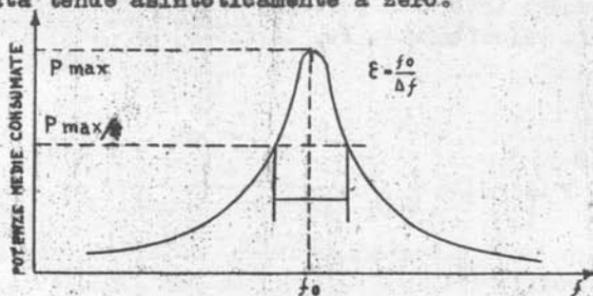


fig.25

Il coefficiente di risonanza ϵ , come nel caso elettrico è dato dal rapporto tra la frequenza di risonanza e la larghezza della curva in corrispondenza dell'ordinata $P_{\max}/2$.

L'unica causa di consumo medio di potenza in una oscillazione meccanica, è da attribuirsi alla presenza della a , comprendente sia le resistenze utili sia le resistenze passive.

Riferendosi ad un caso concreto, si voglia generare energia acustica in mezzo di resistenza acustica specifica ρ facendo vibrare un pistone di area S normalmente a se stesso affacciato ad una superficie rigida (§ 8 Cap.I). La componente resistiva della impedenza offerta dal mezzo alle vibrazioni del pistone è definita dalle curve di fig. 21, e sia genericamente ΔS per tutta la superficie S del pistone. Con r si indica genericamente l'insieme delle perdite per attrito del pistone.

Si ha allora:

$$a = r + \Delta S,$$

e per la (II-9) la potenza totale consumata si ripartisce nel rapporto $r/\Delta S$ tra potenza perduta P_p e potenza acustica utile P_u :

$$P_u = \frac{F_0^2 S}{2 \left[(r + \Delta S)^2 + \left(\omega m - \frac{b}{\omega} \right)^2 \right]}$$

$$P_p = \frac{F_0^2 r}{2 \left[(r + \Delta S)^2 + \left(\omega m - \frac{b}{\omega} \right)^2 \right]} \quad (\text{II-11})$$

La potenza acustica utile è massima alla risonanza del sistema:

$$P_{u \max} = \frac{F_0^2 AS}{2(r + AS)^2}$$

Alla frequenza di risonanza, si può vedere facilmente che il massimo di potenza acustica utile si ha per un valore di AS tale che sia:

$$\frac{\partial P_{u \max}}{\partial (AS)} = 0, \text{ cioè } AS = r,$$

confrontando con la (II-10) è:

$$P_{u \max} = \frac{P_{\max}}{2}.$$

La massima potenza non coincide con la condizione di massimo rendimento $\eta = P_u/P$, per il quale occorre invece che AS sia il più grande possibile rispetto ad r .
In generale è:

$$\eta = \frac{P_u}{P} = \frac{AS}{r + AS};$$

per la condizione di massima potenza acustica erogata ($AS=r$);

$$\eta = \frac{1}{2} .$$

Tutto ciò vale supponendo sempre il sistema acusto-mecanico eccitato alla frequenza di risonanza. Fuori della frequenza di risonanza la potenza acustica erogata diminuisce con lo stesso andamento della potenza totale consumata (fig. 25).

Se si vuole che la potenza acustica erogata vari il meno possibile al variare della frequenza occorre, per la (II-11), che $r + AS$ sia grande rispetto a $\omega m - \frac{h}{\omega}$.

Poichè AS in generale non è nei casi pratici aumentabile oltre un certo valore, occorre fare grande r . Con ciò però si ha un peggioramento del rendimento η .

Si riscontra da questo esempio un inconveniente che interviene in pratica in molte trasformazioni acusto-mecaniche. Se si vuole ottenere una erogazione di potenza acustica il meno possibile dipendente dalla frequenza, occorre accettare un rendimento scarso; e viceversa, se il rendimento deve essere assai alto, si ha una potenza erogata variabile con la frequenza.

In altre parole, ciò che si guadagna in fedeltà si perde in rendimento, e viceversa, le condizioni di compromesso sulle quali è opportuno fermarsi sono determinate di volta in volta da pratiche considerazioni.

§ 4) - Sospensione elastica della macchine.-

Un problema che si presenta spesso in pratica è quello di determinare la caratteristica di supporti elastici da disporre al disotto del basamento di una macchina la forza trasmessa al pavimento sia minore di quella che vi risulterebbe applicata fissando direttamente la macchina al pavimento stesso (fig. 26)

La forza F applicata alla macchina, (fig. 2), è :

$$F = f_i + f_a + f_e ,$$

mentre quella F_1 trasmessa al pavimento è uguale alla precedente meno la forza d'inerzia f_1 ;

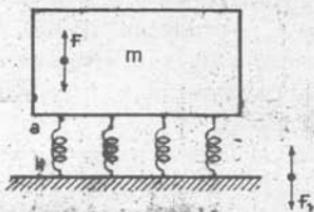


fig. 26

$$F = f_a + f_e$$

Risulta quindi:

$$\frac{F_1}{F} = \frac{f_a + f_e}{f_1 + f_a + f_e}$$

e per la (II-5)

$$\left| \frac{F_1}{F} \right| = \frac{\sqrt{a^2 + \frac{h^2}{\omega^2}}}{\sqrt{a^2 + \left(\omega m - \frac{h}{\omega}\right)^2}}$$

Ricordando che la frequenza di risonanza del sistema elastico è $\omega_0 = \sqrt{h/m}$ si può scrivere:

$$\frac{F_1}{F} = \frac{\sqrt{\frac{a^2}{\omega^2} + \frac{\omega_0^2}{\omega^2}}}{\sqrt{\frac{a^2}{\omega_0^2 m^2} + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \quad (\text{II-12})$$

ove $\omega = 2\pi f$ è la pulsazione di lavoro della macchina.

Per $\omega = \omega_0$ ed $a \neq 0$ si ha $\left| \frac{r_1}{r} \right| > 1$ ed ha il massimo valore:
 " $\omega = \omega_0$ " $a \rightarrow 0$ " " $\left| \frac{r_1}{r} \right| \rightarrow \infty$
 " $\omega = 0$ " " $\left| \frac{r_1}{r} \right| = 1$
 " $\omega = \omega_0 \sqrt{2}$ " " $\left| \frac{r_1}{r} \right| = 1$
 " $\omega \rightarrow \infty$ " " $\left| \frac{r_1}{r} \right| \rightarrow 0$

La variazione dei valori del rapporto $\left| \frac{r_1}{r} \right|$ al variare di ω è illustrata in figura ove si nota anche che il massimo diviene meno pronunciato al crescere di a .

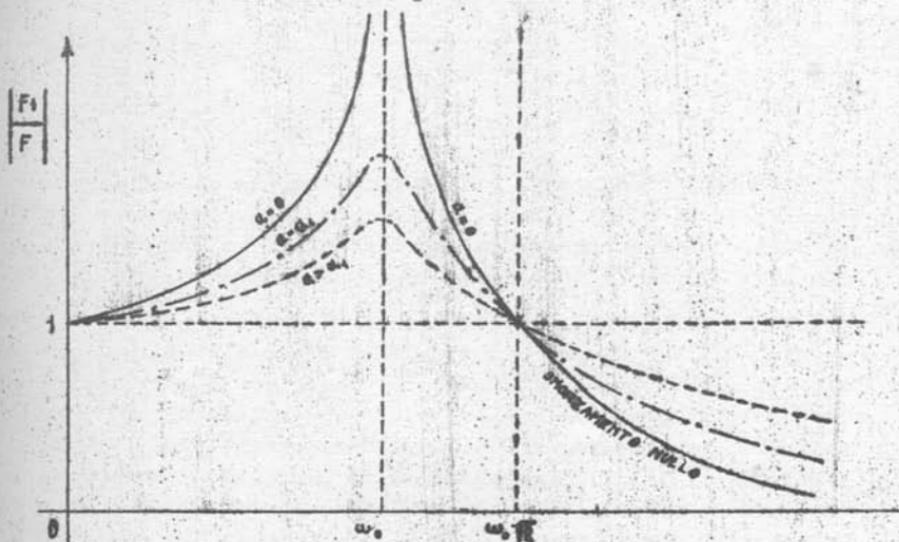


fig.27

Perchè sia $\left| \frac{F_1}{F} \right| < 1$ deve essere:

$$\omega > \omega_0 \sqrt{2} \quad (\text{II-13})$$

ossia occorre che la pulsazione ω_0 che risulta dalla presenza della massa m della macchina e dalla elasticità dei supporti di risonanza interposti sia minore di $\frac{\omega}{\sqrt{2}}$ in cui ω è la pulsazione delle macchine, o la fondamentale dello sviluppo in serie dell'andamento periodico della vibrazione, cioè la frequenza più bassa possibile. Per le frequenze di lavoro inferiori, a parità di ogni altra condizione, la riduzione è ancora maggiore. Si ottiene un più forte rapporto di riduzione facendo tendere $a \rightarrow 0$, cioè annullando gli attriti. In tal caso si ha:

$$\left| \frac{F_1}{F} \right| = \frac{\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2} \quad (\text{II-14})$$

In tali condizioni, è da tener presente che si avrà un periodo di crisi quando, nella fase di avviamento o di arresto, la frequenza della macchina assumerà transitoriamente il valore ω_0 . La forza F_1 , nel pavimento, pur raggiungendo valore molto grande (valore infinito nel caso teorico di $a = 0$) non è tuttavia in grado di compiere un elevato lavoro purchè durante l'avviamento o l'arresto, tende a zero il tempo nel quale tale forza assuma valori elevati. Si deve ricordare che, con l'interposizione di supporti elastici tra la macchina ed il pavimento, aumenta la ampiezza di vibrazione della macchina, ed occorre perciò assicurarsi che in conseguenza essa non venga danneggiata o venga compromessa la sua sicurezza di funzionamento.

Non si deve tuttavia confondere il problema della ri-

duzione delle forze applicate qui studiate, con quello dell'isolamento sonoro degli ambienti, che verrà esposto nel capitolo III. In quest'ultimo non si hanno forze localmente generate, bensì onde sonore migranti e le costanti dei materiali non sono concentrate come nel caso precedente, bensì distribuite.

o o o o o o

o o o o

o o

o

Cap. III

ACUSTICA AMBIENTALE

—00s—

§ 1) - Trasmissione dei suoni.

Nel § del Cap. I sono stati determinati i coefficienti di riflessione e di trasmissioni per onde piane propagantesi da un primo o mezzo verso un secondo separati da una superficie piana.

Tuttavia se le resistenze acustiche dei due mezzi differiscono di una quantità infinitesima, od in altre parole, se la resistenza acustica del materiale varia gradualmente con la distanza, l'onda sonora piana si propaga attraverso il materiale, adattandosi man mano alle resistenze acustiche che incontra senza dar luogo ad alcuna riflessione.

Viceversa, se, la velocità di propagazione è varia gradualmente secondo il fronte d'onda, la propagazione non ha luogo in linea retta, bensì secondo una traiettoria curva che si potrebbe assai semplicemente determinare.

Per avere in un ambiente un minimo di riflessioni occorre passare con gradualità dalla resistenza acustica dell'aria a quella del materiale delle pareti. La variazione praticamente graduale di resistenza acustica si ottiene rivestendo la parete di strati di materiali il più possibile sottili di resistenza acustica diversa in modo da formare una successione crescente dall'aria verso la parete.

Ad esempio si può realizzare la successione seguente di materiali che ricevono un muro: aria, falde di cotone sofficiissime e diradate, falde di cotone normali, feltro,

legno, muro.

Se invece si vuole isolare acusticamente un ambiente occupato da un mezzo, in cui si propaga un'onda piana, da un secondo mezzo, occorre in generale sistemare tra i due, vari strati contigui di materiali aventi resistenza acustica il più possibile diversa tra di loro.

Per esempio si può avere una serie di pareti di spessori di alcuni centimetri ciascuna, separata da strati di aria o di materiale poroso.

La realizzazione pratica di una parete assorbente deve essere fatta grazie a speciali disposizioni di materiali nei quali non oltre la variazione graduale di ρc , si usi la scabrosità e la disuniformità delle superfici. In fig.28 è riportata la disposizione da darsi ai materiali che devono ricoprire una parete in muratura per renderla il più possibile assorbente ai suoni, ove è indicata esclusivamente la sezione orizzontale di una parete assorbente.

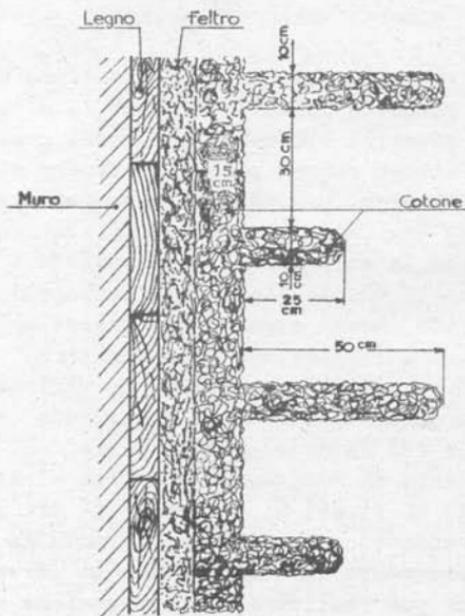


fig.28

Anche per l'isolamento acustico di ambienti occorre sospendere praticamente le pareti, il pavimento ed il soffitto anche usando apparati elastici già predisposti per l'appoggio delle pareti (fig.29) e vari speciali accorgimenti.

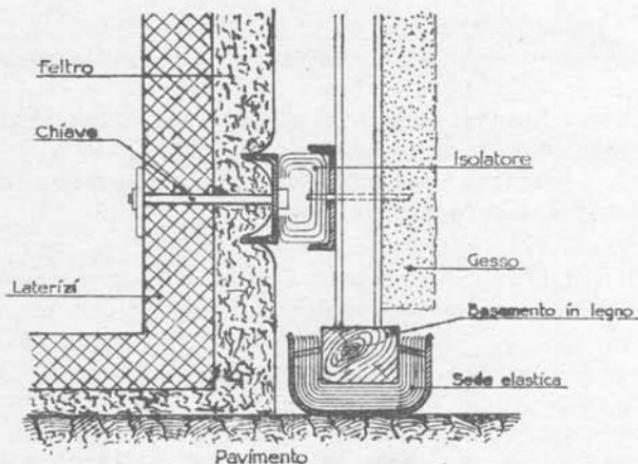


fig.29

In quasi tutti i casi reali, se si misurano la potenza specifica riflessa e quella trasmessa, si trova che la loro somma non è uguale alla potenza specifica incidente, ma sempre minore.

Ciò significa che nella trasmissione una parte di potenza viene assorbita e trasformata in calore.

Questo assorbimento è dovuto all'attrito interno degli elementi del materiale, ed è tanto più grande quanto più sono rilevanti la porosità e la scabrezza della superficie di separazione, e la viscosità del materiale stesso.

La potenza non riflessa si compone di una parte assorbita e di una parte trasmessa, e si può quindi in pratica, introdurre accanto al coefficiente di riflessione ed al coefficiente di trasmissione anche il coefficiente di assorbimento, dove quest'ultimo è relativo a tutta la parte non riflessa.

Per quanto ora detto il coefficiente di assorbimento è dato da:

$$a = 1 - r = 1 - \frac{P_r}{P_i}, \quad (\text{III-1})$$

ove $r = \frac{P_r}{P_i}$ è il coefficiente di riflessione e P_r e P_i sono rispettivamente la potenza specifica riflessa e la potenza specifica incidente.

Talvolta si definisce, impropriamente, come coefficiente di assorbimento il numero

$$a' = 1 - \frac{p_r}{p_i}, \quad (\text{III-2})$$

ove p_r e p_i sono le pressioni riflesse e incidente.

Poichè l'onda riflessa si propaga ancora nel primo mezzo come l'onda incidente è:

$$r = \frac{P_r}{P_i} = \frac{p_r^2}{p_i^2}, \quad (\text{III-3})$$

da cui si ricava, confrontando con la (III-1) e (III-2)

$$a' = 1 - \sqrt{1 - a} \quad (\text{III-4})$$

cioè a ed a' possono differire notevolmente l'uno dall'altro.

Il coefficiente α ricavato sperimentalmente per materiali reali rispetto all'aria può differire anche notevolmente dal rapporto t teorico (I-41) ricavabile per materiali omogenei, non viscosi separati da una superficie piana, e per la stessa ragione α' può differire anche notevolmente dalla espressione data dalla seconda della (I-39).

Inoltre poiché i materiali che si incontrano nei casi pratici sono sempre imperfettamente omogenei e porosi hanno uno spessore non infinito, ed hanno superfici non piane, bensì sempre alquanto scabre, il coefficiente di assorbimento α dipende generalmente dalla frequenza; più alto per alte frequenze acustiche e più basso per basse frequenze acustiche.

Le tabelle I e II riportano i valori del coefficiente di assorbimento di potenza rispetto all'aria per alcuni materiali di uso frequente, e mostrano la sua variazione in funzione della frequenza.

Tabella I

Coefficienti apparenti di assorbimento e di riflessione a 512 Hz rispetto all'aria (onda incidente diretta dall'aria verso il materiale).

M a t e r i a l e	Valori medi del coefficiente di assorbimento α	Valori medi del coefficiente di riflessione α'
Finestra aperta su aria libera	1,00	0,00
Muro intonacato	0,031	0,969
Muro verniciato	0,017	0,983
Cemento liscio	0,015	0,985
Marmo	0,010	0,990
Legno (superf. naturale)	0,06	0,94
Legno lucidato	0,03	0,97
Vetro (spessore 3 * 5 mm.)	0,02	0,98
Tappeti (secondo lo spessore)	0,15 * 0,25	0,85 * 0,75
Tendaggi	0,20	0,80
Cuscini (segue a pag.98)	0,6 * 0,7	0,4 * 0,3

(segue tabella I)

Feltro spessore 4 cm. secondo qualità	0,5 ± 0,6	0,5 ± 0,4
Area occupata da persone (almeno 2,5 persone per m ²).	0,90± 0,95	0,10± 0,5
Materiali agglomerati di fibra di legno (spessore 1-4 cm), come: popolit, masonite faesite, celotex, acustotex, insulite, ecc.	0,30± 0,90	0,7 ± 0,10

Tabella II

Coefficienti di assorbimento alle diverse frequenze.

Materiale	Frequenze in Hz					
	123	256	512	1024	2048	4096
Muro intonacato	0,024	0,026	0,031	0,042	0,049	0,070
Area occupata da persone (2 + 3 per m ²).	0,70	0,90	0,95	0,98	1	1
Stoffa di cotone applicata su muro (peso 350 g/m ²)	0,3	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35

I materiali artificiali, citati nell'ultima voce della tabella precedente hanno coefficienti di assorbimento molto variabili dall'uno all'altro ed in funzione della frequenza, i cui valori si trovano nei listini e nei manuali.

§ 2) - Propagazione sonora entro un ambiente limitato.

Una sorgente sonora in un ambiente chiuso da luogo, ad una distribuzione sonora per successive riflessioni nelle pareti, come risulterebbe da un insieme infinito di sorgenti sonore, tutte immagini l'una dell'altra rispetto ai piani delle pareti dello ambiente.

Se tale ambiente è, ad esempio, di forma rettangolare, la disposizione delle sorgenti e immagini della sorgente effettiva A è indicato in figura 30 per mezzo di puntolini.

In un punto P dell'ambiente la pressione sonora è la risultante delle pressioni generate dalle infinite sorgenti.

Se la sorgente sonora A è impulsiva, ad esempio un colpo di pistola, tra l'istante t dopo l'impulso stesso e l'istante $t + \delta t$, generano pressione nel punto P solo le sorgenti virtuali comprese tra due cerchi con centro in P e raggi ct e $c(t + \delta t)$.

Se le pareti dell'ambiente sono perfettamente riflettenti, tutte le sorgenti immagini sono identiche, e sono in fase od in opposizione di fase colla sorgente reale S. In tali condizioni limiti è chiaro che la densità di energia E, cresce linearmente nel tempo tendendo all'infinito, od il suono dell'ambiente, continuando ad erogare la sorgente A non arriva mai a condizione di regime.

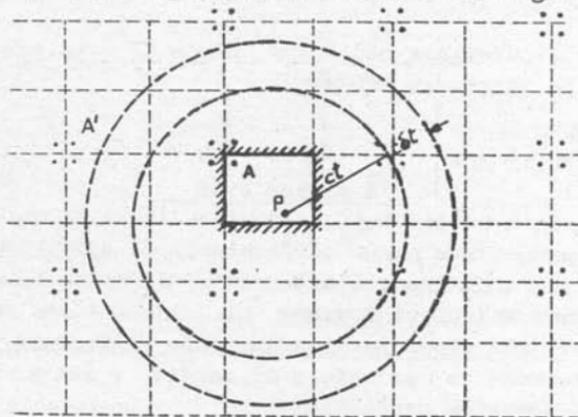


fig.30

Se l'ambiente non è completamente chiuso, ma ha un'apertura con assorbimento unitario (finestra aperta), è facile trovare l'energia che transita dall'apertura nell'unità di tempo in funzione della densità di energia E che esiste nell'ambiente.

Nell'elemento di volume dV si trovi (fig.31) in un determinato istante una densità di energia E dV . Questa energia si propaga in ogni direzione con velocità C e la porzione di essa che transita attraverso la superficie dS , la cui normale forma l'angolo θ con la congiungente dS con dV , è data da:

$$E dV \frac{d\Omega}{4\pi}$$

in cui $d\Omega$ è l'angolo solido sotto cui si vede dS da dV cioè:

$$d\Omega = \frac{dS \cos \theta}{r^2}$$

ed r è la distanza media tra dS e dV . La parte di energia che raggiunge dS è:

$$\frac{E dV \cos \theta dS}{4 \pi r^2}$$

Tutti gli elementi di volume che si trovano nel toroide di sezione r dr $d\theta$ e di raggio $r \sin \theta$ si trovano nelle medesime condizioni.

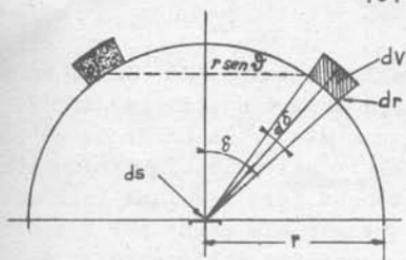


fig.31

Il volume del toroide è:

$$2 \pi r^2 \sin \theta d\theta dr$$

e l'energia che questo toroide irradia su dS è:

$$\frac{E \cos \theta dS}{4 \pi r^2} 2 \pi r^2 \sin \theta d\theta dr = \frac{E dS}{2} \sin \theta \cos \theta dr d\theta$$

L'energia totale dE_{tot} che transita per dS in un intervallo di tempo dt è quella che proviene da un emisfero di raggio $r = c dt$

$$dE_{tot} = \frac{E}{2} dS \int_0^{c dt} dr \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta$$

$$\frac{dE_{tot}}{dS dt} = \frac{Ec}{4} \quad (III-4)$$

Durante la fase crescente della densità di energia sonora, che segue l'inizio del funzionamento delle sorgente A la energia che transita nel tempo dt dalla finestra S è minore di quella generata nello stesso tempo dalla sorgente.

Il suono raggiunge la condizione di regime allorchè la densità di energia E nell'ambiente è tale che l'e-

nergia generata nell'intervallo di tempo dt dalla sorgente A uguaglia l'energia che sfugge dalla finestra S .

Interrompendo il funzionamento della sorgente A , durante la fase decrescente del transitorio, la diminuzione del prodotto della densità sonora per il volume dell'ambiente deve essere uguale all'energia che passa per l'apertura di sezione S , o che viene assorbita dalle pareti, dell'ambiente, delle quali $S = \Sigma \alpha_i S_i$ è l'assorbimento complessivo, ove il segno negativo tiene conto della diminuzione della densità di energia E .

$$\frac{\partial (VE)}{\partial t} = - \frac{E S c}{4} .$$

La soluzione di questa equazione differenziale dà:

*soluzione legge esponenziale
per il transiente $\frac{cS}{4}$*

$$\log E = - \frac{c S}{4V} t + K$$

in cui la costante di integrazione K si determina con la condizione che per $t = 0$ sia $E = E_0$; cioè contando lo inizio dei tempi dall'istante in cui la sorgente A cessa di funzionare, in cui la densità di energia aveva il valore di regime E_0 . Cioè:

$$K = \log E_0 ;$$

da cui:

$$\log_e \frac{E}{E_0} = - \frac{cSt}{4V} , \text{ od anche: } \log_{10} \frac{E}{E_0} = 0,434 \frac{cSt}{4V} .$$

§3) - Tempo di riverberazione.-

La densità di energia sonora si riduca ad $1/10^6$ di quella iniziale E_0 , dopo un tempo T tale che:

$$\log_{10} 10^6 = 0,434 \frac{cST}{4V}$$

od anche:

$$T = \frac{0,164 V}{S} \quad (\text{III-5})$$

Se in luogo dell'apertura di sezione si pone la sommatoria degli assorbimenti delle pareti dell'ambiente, si ha:

$$T = \frac{0,164 V}{\sum_i a_i S_i} \quad (\text{III-6})$$

Il tempo T si chiama tempo di riverberazione dell'ambiente, ed è il tempo nel quale la densità di energia sonora, in assenza di sorgente sonora, si riduce ad un milionesimo; od anche, ciò che fa lo stesso, il tempo in cui la pressione sonora p si riduce ad un millesimo. Questa formula fu già trovata empiricamente da Sabine, e vale per ambienti di media grandezza ($100 + 3000 \text{ m}^3$) e di forma usuale, cioè con le tre dimensioni dello stesso ordine di grandezza.

Essa vale se lo spazio è uniformemente riempito dal suono, quando cioè l'assorbimento delle pareti sia piccolo, affinché occorra un gran numero di riflessioni per estinguere il suono. L'andamento esponenziale della densità di energia sonora fa sì che il tempo di riverberazione si chiami anche coda sonora (fig.32).

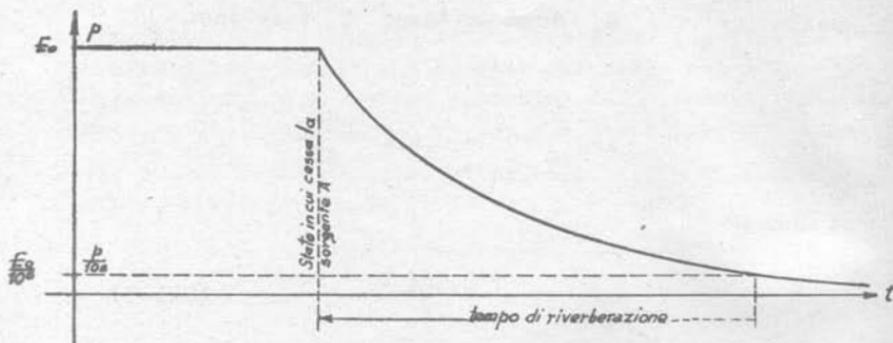


fig.32

La formula di Sabina è di difetto per tempi di riverberazione assai piccoli, dell'ordine dei decimi di secondo. Essa fu provata empiricamente e poi rigorosamente dimostrata.

L'andamento indicato in fig.32 è però schematico e ben difficilmente si riscontra in ambienti reali a causa della distribuzione non uniforme dell'energia sonora nel locale, per risonanza secondo le dimensioni e per differenti assorbimenti delle pareti.

L'andamento della pressione sonora in un punto di un ambiente in funzione, del tempo ha fluttuazioni più o meno accentrate intorno ad un andamento esponenziale (fig.33) ma tale fluttuazioni tendono a compensarsi se viene fatta la somma delle pressioni sonore rilevate in due o più punti dell'ambiente.

In ogni ambiente una certa riverberazione è necessaria ad una armoniosa ascoltazione della parola e della musica. Il nostro udito per la lunga abitudine apprezza un giusto valore di riverberazione; un tempo T troppo corto dà la sensazione di parola e musica secca e senza alcun colorito, un tempo di riverberazione troppo lungo non permette più di distinguere nettamente le sillabe ed aumenta il

rimbalzo della musica. Il tempo di riverberazione ottimo degli ambienti è variabile negli intervalli 1,3 sec. per la parola ed 1,5 + 2 sec. per la musica, se il volume dell'ambiente cresce, il tempo di riverberazione ottimo tende al limite superiore.

Tempi di riverberazione maggiori - come avviene nella maggioranza dei casi - possono essere ridotti correggendo acusticamente i locali, con l'introduzione di opportuno materiale assorbente.

Un certo tempo di riverberazione è anche utile per aumentare l'intensità del suono per una data potenza della sorgente sonora.

A regime infatti la potenza assorbita dalle pareti deve essere uguale a quella $P = d E_{\text{tot}} / dt$ fornita dalla sorgente, cioè per la (III-4):

$$P = \frac{E c \sum a_i S_i}{4} ,$$

da cui, per la formula di Sabine,:

$$E = \frac{4P}{c \sum a_i S_i} = \frac{4}{0,164 c} \frac{P}{V} T$$

$$E = 0,072 \frac{P}{V} T \quad (\text{III-7})$$

Questa relazione vale entro i limiti di validità della formula di Sabine stessa, cioè per volume V e tempi di riverberazione T non troppo piccoli.

Nel progetto di ambienti in cui si debba ascoltare musica canto o parola (teatri, cinema ecc.), oltre a far sì che il tempo di riverberazione sia quello ottimo, bisogna studiare le posizioni delle sorgenti sonore, l'andamento delle pareti laterali e del soffitto in modo tale che, in corrispondenza del pubblico non si abbiano echi di impulsi sonori dopo una sola riflessione.

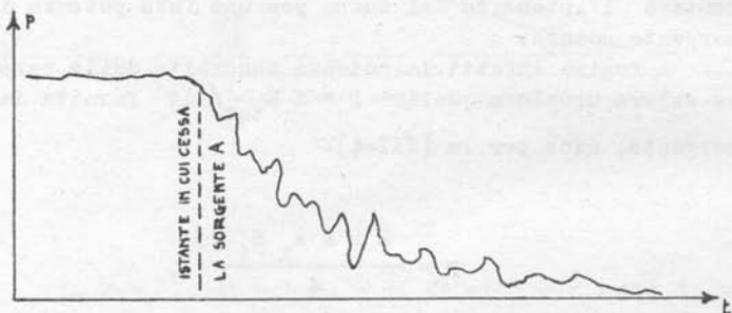


fig.33

Evitare gli echi, e concentrare il più possibile in modo uniforme nel pubblico il suono emesso dalla sorgente A, costituisce uno dei problemi fondamentali dell'acustica architettonica. Per soddisfare queste esigenze le sagomature delle pareti e del soffitto degli ambienti che servono per un numeroso pubblico assumono una forma geometrica definita, con la quale si sfruttano le riflessioni (fig. 34) per far sì che nei punti più lontani della sorgente A la somma dell'onda che giunge direttamente con quelle riflesse (dopo una sola riflessione), diano risultante circa uguale a quella che si ha nei punti più vicini alla sorgente stessa.

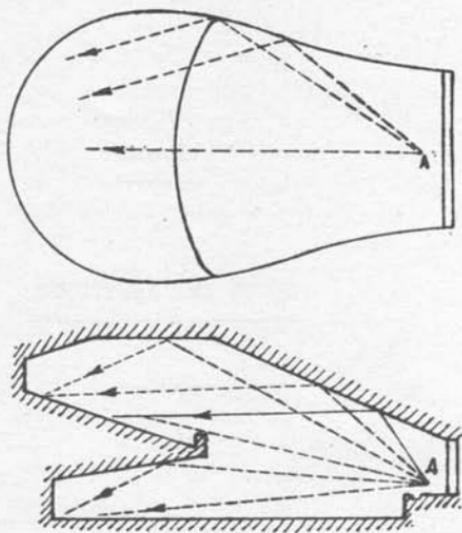


fig.34



Cap. IV

STRUTTURA DEI SUONI

—oOo—

1) - Analisi dei suoni.

In un determinato mezzo si consideri una delle grandezze che definiscono il fenomeno sonoro: ad esempio la pressione. Di ogni suono è possibile determinare l'ampiezza e la frequenza delle componenti che lo costituiscono, ricavabili dallo sviluppo con la serie o con l'integrale di Fourier. La rappresentazione grafica che si ottiene si chiama spettro del suono in esame.

In suoni a regime possono essere classificati nel modo seguente:

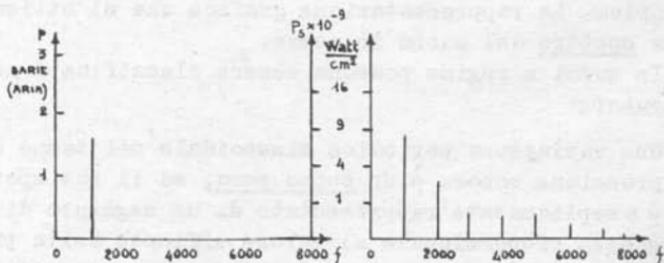
- a) - Una variazione periodica sinusoidale nel tempo della pressione sonora è un suono puro, ed il suo spettro è semplicemente rappresentato da un segmento di lunghezza proporzionale al valore efficace della pressione sonora (o proporzionale alla potenza specifica), in corrispondenza di quella frequenza (fig.35 a).
- b) - Una variazione semplicemente periodica, ma in forma non sinusoidale, è un suono con armoniche, le cui componenti sono facilmente ottenibili dalla serie di Fourier (fig.35 b).
- c) - Una variazione periodica, non sinusoidale, ma con periodi (o pseudo periodi, cioè definiti da passaggi per lo zero) di diverso ordine, come ad esempio un

battimento, dà luogo a diversi suoni con armoniche, le cui fondamentali possono essere anche incommensurabili (fig. c).

d) - Una variazione non periodica, ma a valor medio nullo, scomponibile a mezzo dell'integrale di Fourier in una infinità di componenti, di ampiezza infinitesima, di cui è possibile definire l'andamento dell'involuppo. L'insieme di queste componenti, che possono essere comprese entro gamme finite od infinite di frequenza, prende il nome di spettro continuo (fig. d). Tipici, con questo spettro, sono i fenomeni sonori definiti da leggi casuali, ad esempio il fruscio.

In pratica, nel caso più generale, si possono trovare suoni il cui spettro è un insieme di quelli elencati in c) e d).

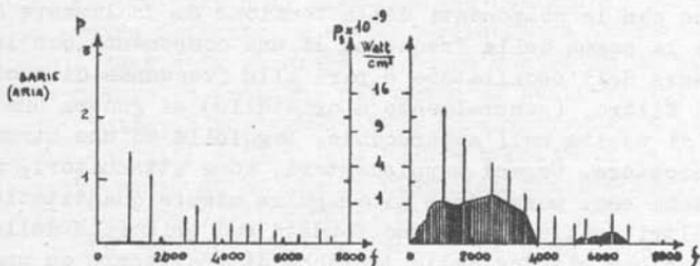
A rigore, poichè nessun suono reale è a regime per un tempo indefinito nei due sensi, si hanno sempre spettri continui,



a)

b)

fig.35



c)

d)

fig.35

ma i transitori che nascono dal sorgere o dall'estinguersi di un suono hanno durate in pratica finite, ed assai corte, di modo che è perfettamente lecito parlare di fenomeni periodici e quasi periodici quindi scomponibili in sinusoidi di ampiezza finita.

Un suono in cui prevale la potenza contenuta nello spettro continuo rispetto a quella nello spettro discontinuo è generalmente sgradevole, ed in tal caso, prende il nome di rumore.

La potenza specifica di un suono è pari alla somma geometrica delle potenze specifiche relative alle sue componenti, non intervenendo in alcun modo le relazioni di fase che sussistono fra di loro.

Esistono strumenti di misura con i quali è possibile effettuare la scomposizione dei suoni nelle loro componenti, che prendono il nome di analizzatori. Essi sono in generale schematicamente costituiti da un microfono fedele che ha lo scopo di dare una tensione che abbia nel tempo un andamento simile a quello della pressione sonora: da un oscillatore locale a frequenza variabile con continuità,

da un mescolatore, da un amplificatore-filtro accordato. La frequenza dell'oscillatore, variando con continuità, interferisce con le componenti della tensione da analizzare a quando la somma della frequenza di una componente con la frequenza dell'oscillatore è pari alla frequenza di accordo del filtro, (generalmente a cristallo) si genera una tensione di uscita nell'apparecchio, leggibile su uno strumento indicatore. Organi supplementari, come attenuatori, compensatori ecc. permettono di eseguire misure quantitative.

Altri analizzatori sono fondati sul principio della commutazione ritmica della tensione da analizzare su una serie di circuiti accordati su bande di frequenza contigue in modo da prelevare direttamente le componenti medie esistenti nelle singole bande di frequenze.

§ 2) - Riproduzione sonora.-

Per riproduzione sonora si intende, in generale, la generazione in una zona di spazio, di un campo sonoro identico o simile a quello esistente in un'altra zona di spazio.

Le due zone sono in generale distinte ed i tempi in cui hanno luogo le generazioni dei suddetti campi sonori possono essere in generale, distinti. In senso rigoroso la riproduzione sonora non è quasi mai possibile, ma ci si deve accontentare di una certa approssimazione, e si può misurare il grado di approssimazione raggiunta.

Poichè la riproduzione del suono avviene attraverso la corrispondenza di un sistema di grandezze acustiche con un sistema di grandezze elettriche e viceversa da queste in acustiche, e poichè tre sono le dimensioni geometriche dello spazio entro cui variano le grandezze acustiche mentre le dimensioni geometriche in cui variano le grandezze elettriche è di solito solo una o nessuna, è intuitiva l'impossibilità pratica di una riproduzione rigorosamente esatta.

Per tentare di effettuare l'esperienza ideale di una riproduzione esatta si potrebbe pensare di usare ω^3 "canali" elettroacustici in modo da riprodurre il campo sonoro punto per punto. Ciò, oltre ad essere praticamente irrea-

irrealizzabile per l'impossibilità di avere "organi di presa" (microfoni) e di riproduzione (telefoni) puntiformi ed in numero infinito, è anche teoricamente inesatto perchè non è possibile generare un campo sonoro in un punto senza che questo si propaghi nel mezzo ai punti vicini.

Tuttavia tollerando tale inconveniente, e senza impiegare infiniti canali, può essere effettuata la riproduzione per mezzo di un numero finito (in pratica sempre molto piccolo: 2 o 3) di canali (fig. 36).

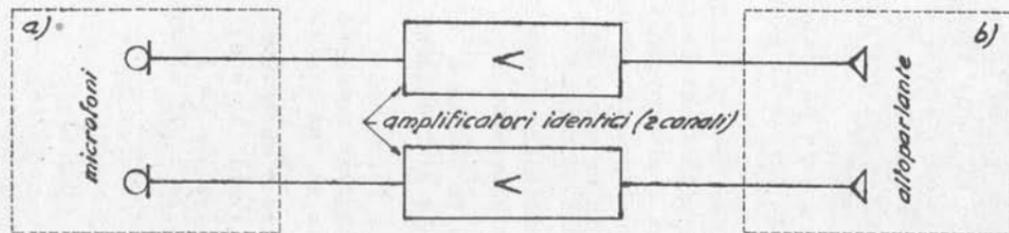
La riproduzione che tende a dare un campo sonoro sufficientemente simile ad un altro prende il nome di riproduzione stereofonica.

Nella enorme maggioranza dei casi pratici, però, la riproduzione non ha alcun requisito di stereofonicità, venendo effettuata a mezzo di una o più sorgenti sonore, le quali generano onde in fase fra loro, con pressioni proporzionali alla pressione sonora in un punto del campo da riprodurre.

I requisiti a cui deve soddisfare un qualsiasi quadripolo per una perfetta riproduzione sono:

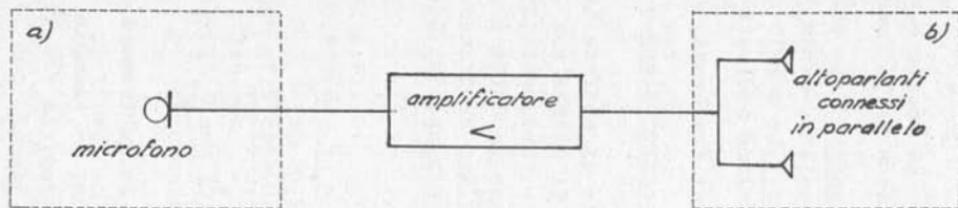
- 1) - rapporto fra la grandezza in uscita e quella in entrata, costante entro la banda di frequenza che interessa.
- 2) - sfasamento fra le due grandezze suddette proporzionale alla frequenza entro la stessa banda.

Qualora la banda di frequenza si estenda da 0 ad ∞ , si può dimostrare che le condizioni 1) e 2) non sono più indipendenti: conoscendo la curva che dà il rapporto delle ampiezze, si può calcolare quella degli sfasamenti e, a meno di costanti, viceversa.



- a) spazio in cui esiste il campo sonoro da riprodurre.
- b) spazio in cui esiste il campo sonoro riprodotto.

fig.36 - Riproduzione approssimativamente stereofonica.



- a) spazio in cui esiste il campo da riprodurre.
 b) spazio in cui esiste il campo sonoro riprodotto.

fig.37 - Riproduzione normale non stereofonica.

§ 3) - Distorsioni.

Le distorsioni che, in un quadripolo, interessano la riproduzione della parola e della musica sono essenzialmente di due specie.

Il rapporto tra le grandezze di uscita e per quelle di entrata p_e , riportato in funzione della frequenza, può definire una curva, (curva di risposta) che può discostare dalla parallela all'asse delle ascisse, dando luogo a ciò che si chiama distorsione lineare. Lo scarto appreso in decibel $\pm a$ della curva da un valore medio, (p_u/p_e) medio, definisce una determinata gamma di frequenza, $f_1 - f_2$ (fig.

38), che si chiama gamma in riproduzione o semplicemente gamma relativa allo scarto.

Se una grandezza sinusoidale di entrata in un quadripolo, dà luogo ad una grandezza di uscita non esattamente sinusoidale, bensì scomponibile in fondamentale armoniche, la radice del rapporto tra la potenza delle armoniche e quella della fondamentale, si chiama coefficiente di distorsione non lineare, o di seconda specie. Esso è:

$$\delta = \frac{\sqrt{P_2^2 + P_3^2 + \dots}}{P_1}, \quad (\text{IV-1})$$

ove P_1 , P_2 , P_3, \dots sono le ampiezze della fondamentale e delle successive armoniche, ad esempio la pressione.

Il coefficiente δ di distorsione non lineare aumenta al crescere della potenza in gioco, con leggi più rapide della distorsione lineare ed in generale varia al variare della frequenza.

In una riproduzione la distorsione non lineare è più dannosa e sentita di quella lineare, e già il 4 + 6 % costituisce un limite superiore da non oltrepassare per

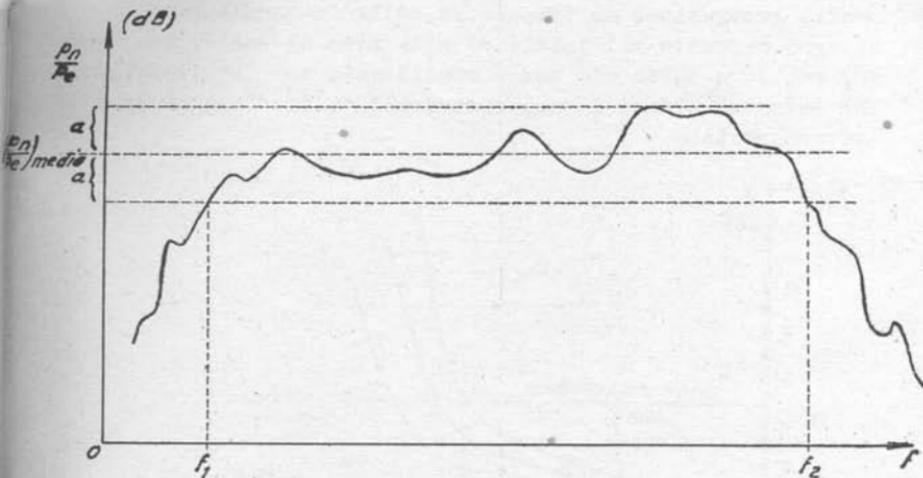


fig.38

non compromettere inammissibilmente la fedeltà, mentre una variazione di 2 * 3 db nella curva di risposta è a mala-pena percettibile.

Una riproduzione di voce si distingue quasi sempre dall'originale a causa di una sfumatura metallica che è appunto dovuta alle armoniche di ordine elevato della distorsione non lineare.

La distorsione non lineare definisce un limite di potenza totale P_u di uscita per molti apparecchi elettroacustici o radioelettrici; limite in generale minore di quelle dovuto al riscaldamento (fig.39).

L'aumento di δ è generalmente meno rapido fino ad una certa potenza di uscita P_u e più rapido oltre questo valore, di modo che accettando anche disposizioni superiori ad un certo limite aumenta poco la potenza di uscita ammissibile.

Altre cause di distorsioni possono essere considerate; ad esempio: distorsione di fase, distorsione di batti-

menti, generazione di transitori sulla frequenza propria di ogni circuito all'inizio ed alla fine di ogni treno d'onde, ecc.; e tutto ciò verrà considerato nel seguito allorché verranno citati i vari casi reali di trasformazioni elettroacustiche.

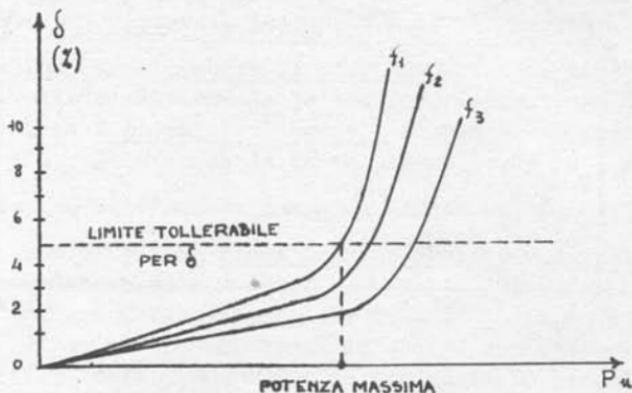


fig.39

oooooooooooo
ooooo
ooo
o

Cap. V

ACUSTICA FISIOLÓGICA

—oOo—

§ 1) -- Udito.--

L'orecchio si divide in tre parti: orecchio esterno, medio ed interno (fig. 40).

L'orecchio esterno è composto dal padiglione che è un'appendice cartilaginosa esterna paragonabile ad una deformata e quasi atrofizzata tromba convergente; dal canale auricolare che è un condotto approssimativamente cilindrico lungo 2 e 3 cm. ed avente sezione media di circa 0,4 cm²; e dalla membrana del timpano che è una sottile e tersa membrana vivente, la quale chiude il canale auricolare.

L'orecchio medio è una cavità, collegata a mezzo di un sottile condotto (canale di Eustachio) al retrobocca, attraverso la quale sono disposti alcuni ossicini: martello, incudine e staffa, collegati tra di loro. Il martello è connesso al centro della membrana del timpano e la staffa è collegata alla membrana di chiusura della finestra ovale, la quale separa l'orecchio medio da quello interno. La catena degli ossicini è paragonabile ad un trasduttore meccanico, analogo ad un filtro passa-basso. Il peso degli ossicini è complessivamente 50 mg.

L'orecchio interno è una cavità irregolare, a pareti ossee, riempita di un liquido organico, che prende il nome di elicotrema. Una parte delle cavità è costituita da due condotti a forma di doppia elica a raggio variabile,

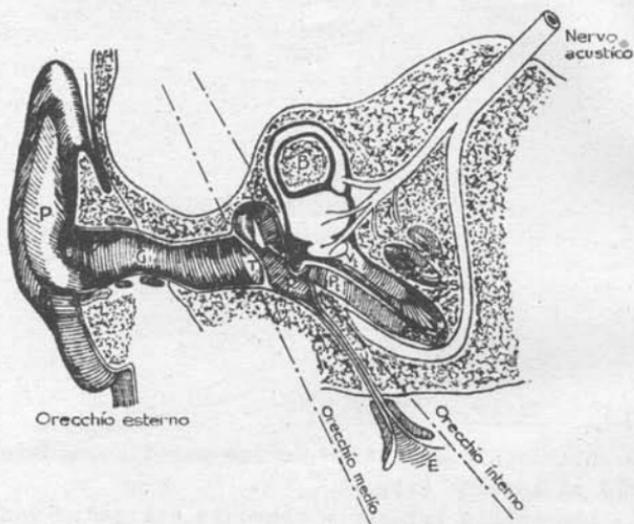


fig40 - Sezione dell'orecchio destro - G, canale auricolare; T membrana del timpano; O, finestra ovale; R, finestra rotonda; B, canale semicircolare; S, chiocciola; E, canale di Eustachio; P, padiglione; P_t canale riempito di liquido organico.

chiamata chiocciola. Le due eliche sono connesse all'estremo superiore da una piccola cavità (elicottrema), cosicchè il liquido può passare da un condotto all'altro.

I due condotti sono separati da una membrana flessibile lunga circa 3 cm. e spessa 0,2 + 0,5 mm. chiamata membrana basilare, e terminiamo verso l'orecchio medio con la finestra ovale e la finestra rotonda, le quali sono chiuse da due sottili membrane.

Una vibrazione della membrana del timpano provocata da un'onda sonora che investe l'orecchio è, per mezzo della catena degli ossicini, ^{trasmesso alla} membrana che chiude le finestra

ovale. La elasticità delle membrane della due finestre, assieme alla massa del liquido contenuto nella chiocciola posto in movimento, generano una eccitazione dei terminali del nervo acustico che si diramano nella chiocciola, il cui meccanismo non è noto: sembra infatti che vi sia generazione di differenza di potenziale fra i vari punti delle pareti della chiocciola ed il resto del corpo e che queste d.d.p. siano lo stimolo fisico dei vari terminali delle diramazioni capillari del nervo acustico che arrivano fino alle pareti suddette. Niente si può dire della relazione che deve sussistere fra stimolo fisico e sensazione fisiologica.

Tuttavia pare che i terminali nel nervo acustico in vicinanza della base della chiocciola siano stimolati verso le alte frequenze acustiche (3000 * 10.000 Hz) e quelli verso l'apice vengano stimolati per basse frequenze acustiche (100 * 500 Hz).

Sembra che impulsi di sensazione nervosa si susseguano in modo quasi indipendente dalla maniera di eccitazione, cioè si ha qualche ragione di ritenere che la conduzione nervosa funzioni circa come un relè.

Dopo che un impulso è stato trasmesso, il nervo deve recuperare la sua sensibilità iniziale prima di essere suscettibile di trasmettere una nuova eccitazione; questo tempo è di circa 0.002 sec..

La intensità di sensazione dipende dal numero di impulsi al secondo trasmessi al cervello.

L'impedenza acustica dell'orecchio medio, intesa come rapporto tra pressione e velocità, ha le due componenti in funzione della frequenza indicata in figura 40 . A circa 3000 Hz la impedenza è una sola resistenza, cioè si ha la "risonanza" degli organi mobili dell'orecchio, ottenendo perciò, a parità di pressione, il massimo della velocità.

Infatti per questa frequenza l'orecchio ha la massima sensibilità. In accordo con questo diagramma è possibile costruire orecchi artificiali, cioè dispositivi aventi forma analoga all'orecchio e con uguale andamento di impedenza, ed un microfono tarato a risposta costante in corrispondenza dell'organo sensibile, con i quali è possibile

PAOLINI - Acustica ed Elettroacustica16

effettuare misure obbiettive.

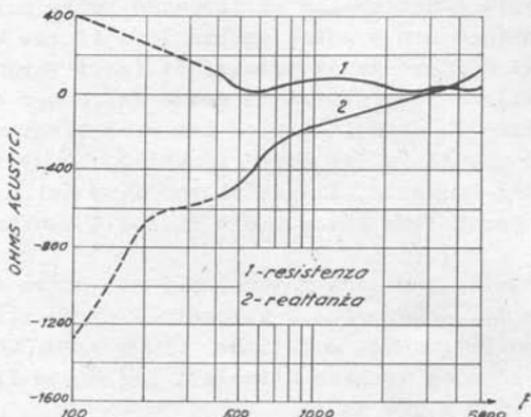


fig.40

Impedenza acustica della membrana dell'orecchio.

Questi modelli sono molte utili per la taratura oggettiva di telefoni nelle reali condizioni di impiego.

Il canale di Eustachio permette l'equilibramento automatico della pressione statica nell'orecchio medio a quella atmosferica esterna, mentre l'equilibramento della pressione nell'orecchio interno a quella esterna può parzialmente avvenire attraverso una variazione della pressione dei vasi. Generalmente però il canale di Eustachio è ostruito e questo causa spesso un senso di disagio al variare rapido della pressione esterna.

Pure entro l'orecchio interno sono i tre condotti ossei chiamati canali semicircolari, i quali sembrano avere una trascurabile funzione acustica, mentre invece pare siano connessi con la sensazione dell'equilibrio.

La spiegazione del meccanismo della sensazione acusti-

ca, come ogni altra questione di sensazione, non è stata ancora trovata, e non sarà possibile trovarla finchè non sarà nota l'essenza fisica o fisico-chimica della eccitazione nervosa; spiegazione questa che non sarà mai possibile trovare.

La sensibilità dell'orecchio è funzione della frequenza ed è compresa entro limiti determinabili sperimentalmente, e variabilissimi da individuo ad individuo, e per lo stesso individuo variabili con le sue condizioni fisiche e con l'età.

Il limite inferiore di sensibilità, per la media degli individui sani e giovani, che prende il nome di soglia di audibilità, può essere determinato in un ambiente di perfetto silenzio. Per le varie frequenze possono essere sperimentalmente ricavate le pressioni sonore al disopra delle quali si comincia ad avere la sensazione della esistenza di suono. L'andamento che così si ottiene è indicato in figura 41. I punti di questa curva sono quindi di sensazione ze ro; la curva ha un minimo poco accentuato e quindi l'orecchio ha un massimo di sensibilità, intorno a 3000 Hz. In questo minimo il valore efficace della pressione è (1 baria = 1 dina/cm²) :

$$p_u = 0,8 \times 10^{-4} \text{ barie} = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ Nw/m}^2.$$

A parità di pressione, la sensazione cala allorchè la frequenza del tono puro si discosta da 3000 Hz.

Si può determinare altresì una soglia di dolore, cioè il luogo dai valori efficaci delle pressioni che, alle varie frequenze, oltre le quali l'orecchio medio comincia a risentire una impressione dolorosa e non più una sensazione auditiva. La curva che risulta è praticamente quasi indipendente dalla frequenza; ed a 1000 Hz, il valore efficace della pressione sonora è circa

$$10^3 \text{ barie} = 10^2 \text{ Nw/m}^2$$

La potenza acustica specifica corrispondente, in aria, al minimo della curva di soglia di audibilità è circa $P_{su} = 0,15 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2$ mentre la potenza acustica specifica corrispondente alla soglia di dolore è $P_{sl} = 20 \text{ W/cm}^2$.

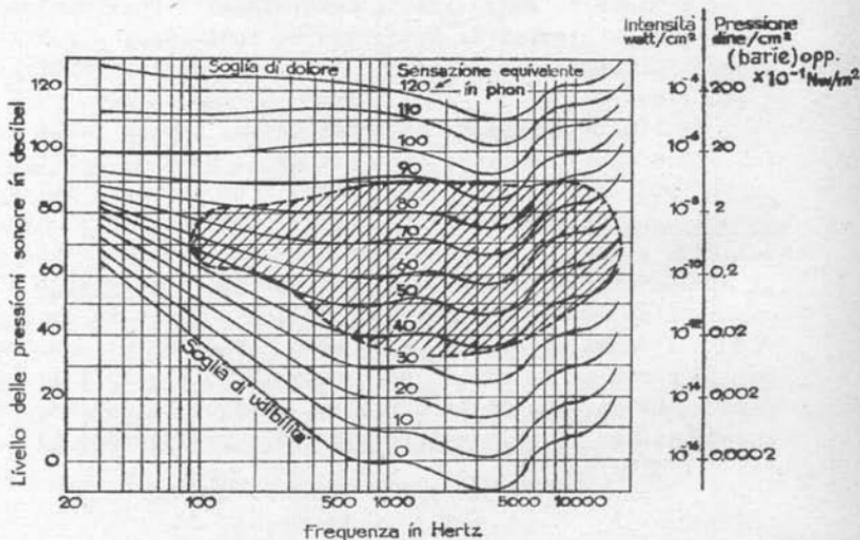


fig.41 - Audiogramma. La parte tratteggiata indica la zona occupata usualmente dai suoni pratici.-

La superficie tra le due curve limiti rappresenta la zona in cui debbono trovarsi i suoni per essere audibili. Tuttavia i suoni che si incontrano nella pratica occupano solo una parte relativamente ristretta nel centro della zona suddetta, indicata in figura 41 al tratteggio.

Per il tono a regime di 1000 Hz, di una determinata pressione p e potenza specifica P_s , si definisce numericamente la sensazione S il numero che risulta prendendo 10 volte il logaritmo decimale del rapporto tra la potenza specifica P_s del suono in esame e la potenza P_{su} di, so-

glia di audibilità a 1000 Hz ($P_{su} \approx 10^{-12} \text{ W/m}^2$); ed anche: S è 20 volte il logaritmo decimale del rapporto tra il valore efficace della pressione p del suono in esame ed il valore efficace della pressione p_u della soglia di udibilità a 1000 Hz ($p_u = 2 \cdot 10^{-4} \text{ dine/cm}^2 = 2 \times 10^{-5} \text{ NW/m}^2$).

$$S = 10 \lg_{10} \frac{P_s}{P_{su}} = 20 \lg_{10} \frac{p_u}{p_{su}} .$$

La sensazione risulta così espressa da un numero puro la cui unità si è convenuto di chiamare "phon" o per analogia con la espressione dell'attenuazione, "decibel". Si dice quindi (per quanto impropriamente) un tono dà una sensazione di 72 Ph, di 85 Ph, ecc. Per i toni diversi da 1000 Hz o per suoni a regime in genere, il numero che dà la sensazione di un tono qualsiasi si definisce così: attraverso le curve dell'audiogramma, cioè sperimentalmente, si cerca il tono a 1000 Hz che ha la stessa sensazione del suono in esame. Il valore di questa sensazione, ottenuto come sopra esposto, è anche il valore della sensazione del tono in esame.

Da individuo ad individuo le curve di uguale sensazione dell'audiogramma (fig.41) possono anche notevolmente differenziarsi, da frequenza a frequenza, da quelle medie riportate in figura, fino a 10 + 20 dB.

E' da osservarsi qui che il decibel di sensazione coincide solo formalmente decibel di attenuazione usato nelle comunicazioni elettriche, perchè mentre il secondo è un numero puro, indipendentemente dalla frequenza, che definisce un qualsiasi rapporto, il primo è un numero con un significato fisico, funzione della frequenza, e relativo ad un determinato rapporto .

Per avere una idea dell'ordine di grandezza dei valori della sensazione, si riportano dei valori medi per alcuni rumori:

Rumori tipici	Sensazione
Soglia di udibilità (o soglia di sensazione)	0 phon
Stormire di foglie	10 "
Rumore medio in una chiesa vuota su strada rumorosa	25 "
Getto d'acqua da un rubinetto di lavandino...	50 "
Conversazione normale ad un metro di distanza	65 "
Motore di automobile	90 "
Tuono	100 "
Piallatrice a legno ad un metro	105 "
Martello pneumatico che batte su acciaio.....	120 "
Soglia di dolore	130 "

Questi risultati si riferiscono in un ambiente assolutamente silenzioso, in uno esista solo il suono in esame; ciò che rarissimamente si verifica. Se l'ambiente non è rigorosamente silenzioso intervengono fenomeni di mascheramento più sensibili quando il suono in esame è debole.

La potenza corrispondenza alla massima sensazione del suono, udibile senza dolore, è circa un miliardo di volte la minima che l'orecchio possa ancora percepire.

Quando il rumore non è a regime, cioè lo spettro varia nel tempo in modo irregolare, od anche, pur restando costante nel tempo, dura solo un tempo molto piccolo, dell'ordine della frazione di secondo, non valgono più le considerazioni precedenti e numerosi teorie sono state fatte per calcolare la sensazione media umana. Tutte conducono a determinare la sensazione da formule più o meno empiriche.

Si è osservato sperimentalmente che il "phon" o il "decibel", definito precedentemente, gode di una proprietà im-

portante e l'orecchio percepisce una variazione di sensazione quando essa è almeno uguale ad 1 phon. Ciò vuol dire che la pressione deve variare di almeno il 12 % e quindi la potenza di almeno il 26 % per sentire tale variazione.

All'aumentare dell'età ed in assenza di malattie la sensibilità media dell'udito cala come indicato nella tabella III.

Tabella III

Frequenza		60&100Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000Hz
Eta'					
da 20 * 29	anni	0	0	6	6
" 30 * 39	"	0	0	16	11
" 40 * 49	"	0	2	18	16
" 50 * 59	"	0	5	30	32

Con malattie (otosclerisi, otite, malattie nervose, ecc.) o lesioni (scoppi vicini, ferite ecc.) si alterano le curve dell'audiogramma, e dalla loro deformazione si può arguire quale tipo di malattia si sia prodotta.

Molto spesso la perdita di sensibilità dell'udito cioè l'innalzamento della curva di soglia di udibilità è accompagnata da un abbassamento della soglia di dolore, cioè da una maggiore intolleranza ai suoni più forti, di modo che la zona utile alla sensazione si restringe notevolmente. Per la protesi di questi difetti, generalmente fatta per mezzo di apparecchi amplificatori di suono (microfono-amplificatore-telefono) individualmente portati, è tanto importante il rinforzo dei suoni deboli quanto la limitazione dei suoni più forti i quali, amplificati dall'appa-

recchio non sarebbero assolutamente tollerabili.

Quando l'orecchio medio è danneggiato, è possibile sen tire ancora, eccitando con un sistema meccanico (telefono osseo), l'osso mastoideale, il quale trasmette la vibrazione direttamente all'orecchio interno.

La soglia di audibilità può anche essere determinata, per le varie frequenze, nel caso che esista già un suono. Per semplicità si considera il caso che il suono preesistente sia un tono puro. Le curve di soglia che si hanno al variare dei parametri costituiti dalla frequenza e dall'ampiezza del tono preesistente, hanno andamento assai diverso da quelle dell'audiogramma normale e prendono il nome di curve di mascheramento (fig.42)

La sensazione del suono, che viene talvolta chiamata anche livello del suono, si misura a mezzo di apparecchi (sonometri) le cui curve di risposta, per i vari "livelli", sono simili alle curve dell'audiogramma.

L'orecchio umano, se accitato con un tono puro, genera localmente delle frequenze armoniche del tono di eccitazione che, assieme al tono puro, danno luogo globalmente alla sensazione con tutte le sue sfumature, cioè l'orecchio si comporta come un circuito meccanico non lineare.

Per quanto le caratteristiche elettroacustiche, obbiet tivamente determinate, siano di notevole importanza per la valutazione delle qualità di un dispositivo, pur tuttavia la prova diretta ad udito è sempre da tenersi in primaria e determinante considerazione.

Se i due orecchi e la direzione di propagazione di un'onda piana sono nello stesso piano (fig.43), il raggio sonoro che arriva all'orecchio di sinistra deve fare un percorso maggiore di quello che arriva all'orecchio di destra, ossia il suono all'orecchio di sinistra è in "ritardo" sul suono all'orecchio di destra.

La presenza di questo ritardo permette sogettivamente di effettuare un apprezzamento biauricolare della direzione di propagazione del suono, cioè l'udito ha proprietà direttive.

L'apprezzamento biauricolare in aria, e senza nessun apparecchio della direzione di provenienza di un suono è dovuto al fatto che i centri del sistema nervoso, ove per-

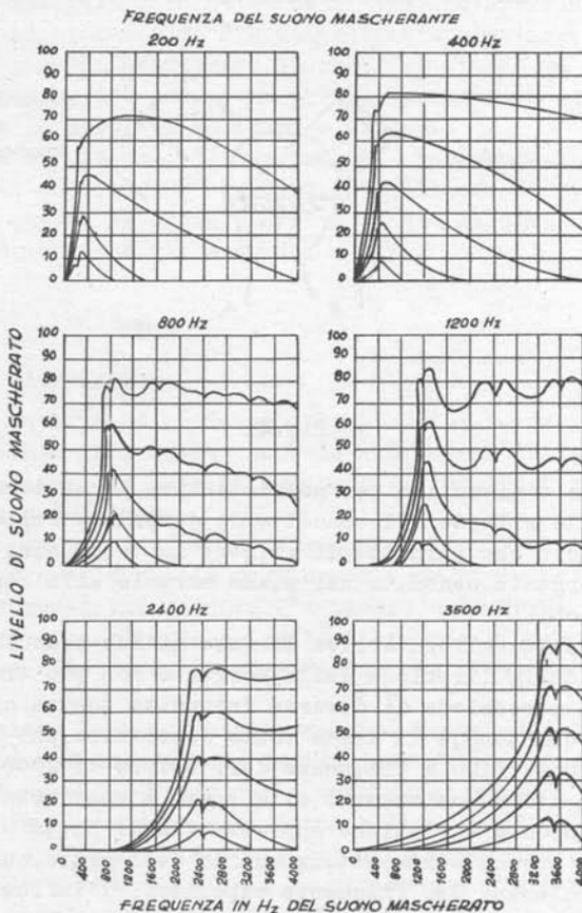


fig.42 - Curve di mascheramento - Ogni curva è contraddistinta dalla sensazione del suono mascherante.

vengono le percezioni delle pressioni sonore raccolte dai due orecchi, sono capaci di apprezzare un ritardo anche piccolissimo dell'una rispetto all'altra. Attraverso una lunga

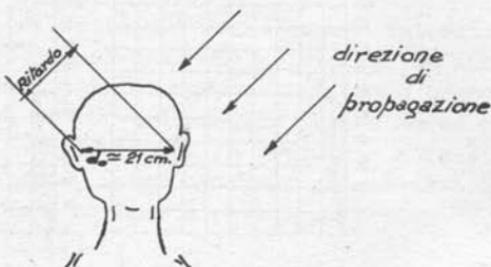


fig.43

abitudine è diventato per noi istintivo il mettere in relazione tale ritardo col concetto di direzione della sorgente sonora; ciò che permette di volgere la testa sino a giudicare la sorgente centrata nel piano normale alla congiungente gli orecchi.

Il suono allora arriva in fase ai due orecchi. L'apprezzamento della direzione della sorgente non può trarre origine dalla percezione di diverse intensità sonore agli orecchi perchè, quantunque la testa possa costituire uno schermo acustico, pure, fino a frequenze dell'ordine di 2000 Hz la diffrazione del suono attorno alla testa è così notevole da non portare alcuna variazione apprezzabile di pressione del suono ad un orecchio rispetto a quella dell'altro, qualunque sia la provenienza. Per frequenze superiori, l'influenza della differenza di intensità può cominciare ad essere apprezzata; ciò è peraltro assai opportuno, perchè, quando la lunghezza d'onda del suono è minore della distanza d , tra i due orecchi ($20 \approx 22 \text{ cm.}$), vi può essere più di una direzione che da la stessa differenza di fase; in tal caso la differente intensità permette di eliminare l'ambiguità.

Anche per le frequenze acustiche basse, ad un determinato ritardo corrispondono evidentemente due direzioni sim-

metriche rispetto alla base formata dagli orecchi. Con lo ascolto diretto l'ambiguità non sembra esistere; e ciò può essere spiegato dal fatto che il timpano arrivano, oltre le vibrazioni raccolte dal padiglione auricolare, anche quel le propagantesi attraverso le ossa del cranio ed in ispecie della fronte. L'impressione globale permette così di ricoscere se la sorgente è dietro o davanti.

Per $d_0 = 21$ cm., il massimo Δt raggiunge in aria il valore di $0,63 \times 10^{-3}$ secondi, ovviamente il ritardo si annulla quando il suono proviene da una direzione normale alla congiungente gli orecchi.

§ 2) - Voce.-

La voce viene prodotta dal getto dell'aria proveniente dai polmoni, il quale causa la vibrazione delle corde vocali, e i muscoli, che ne regolano la tensione, regolano l'acutezza del suono.

Questo suono è però estremamente complesso. La cavità boccale e quella nasale funzionano come risonatori, ed alcune componenti, secondo l'ampiezza e la forma che si dà alla cavità boccale, sono particolarmente rinforzati per risonanza. Ciò è quanto avviene durante il canto delle vocali.

Inoltre labbra, lingua, palato, denti entrano in azione a produrre rumori, che costituiscono le consonanti.

Nel caso del canto delle vocali, si ottiene l'una o l'altra vocale secondo la forma e l'ampiezza della cavità boccale, e l'una o l'altra nota cioè frequenza fondamentale dello spettro, secondo la tensione delle corde vocali.

La parola, ove non sia cantata, ha per la stessa persona la fondamentale sempre della stessa frequenza, e cambia pochissimo da persona a persona. Solo le armoniche di ordine elevato permettono la differenziazione fra vocale e vocale, e, per la stessa vocale, fra persona e persona.

L'udito umano, per educazione e forse anche per attivismo distingue anche minime differenze di armoniche ed è così sensibile alla voce umana da conservare un ricordo co-

si netto, per anni delle voci delle varie persone, tale cioè da permettere subito il loro riconoscimento.

La potenza sonora emessa dalla voce normale durante la parola è in media dell'ordine di 100 erg al secondo (10^5 watt); ed è per il 90 % contenuta tra le frequenze tra 100 e 1200 Hz.

Lo spettro dei suoni emessi dalla voce varia naturalmente a seconda delle persone e del tipo dei suoni emessi, si può tuttavia stabilire un inviluppo dello spettro medio della voce il quale è riportato in fig. 44. Il massimo di potenza è relativo a frequenze comprese tra 150 e 300 Hz, ed un secondo massimo, molto meno accentuato, si ha verso 2000 Hz.

Nella fig.44 è indicata la distribuzione della potenza delle componenti medie che compaiono nella voce in funzione della frequenza.

La $E(f)$ indica l'inviluppo medio di tali componenti e $\int_0^f E(f) df$ è la potenza media contenuta nella voce per tutte le frequenze non superiori ad f . La potenza media della voce tra f_1 ed f_2 è:

$$\int_{f_1}^{f_2} E(f) df$$

Per questa ragione si è assunto per gamma di frequenza che deve essere riprodotta fedelmente dai circuiti telefoni ci per avere una buona comprensibilità, l'intervallo teorico compreso tra 300 e 3000 Hz e l'intervallo pratico tra 350 e 2700 Hz. Questo intervallo, già molto ristretto nel caso della voce, non sarebbe assolutamente ammissibile nella riproduzione della buona musica, ove, è noto che oltre ai requisiti di comprensibilità e riconoscibilità della voce, si devono anche avere requisiti artistici. Si è assunto finora, per la riproduzione radio, l'intervallo 0 e 4500 Hz

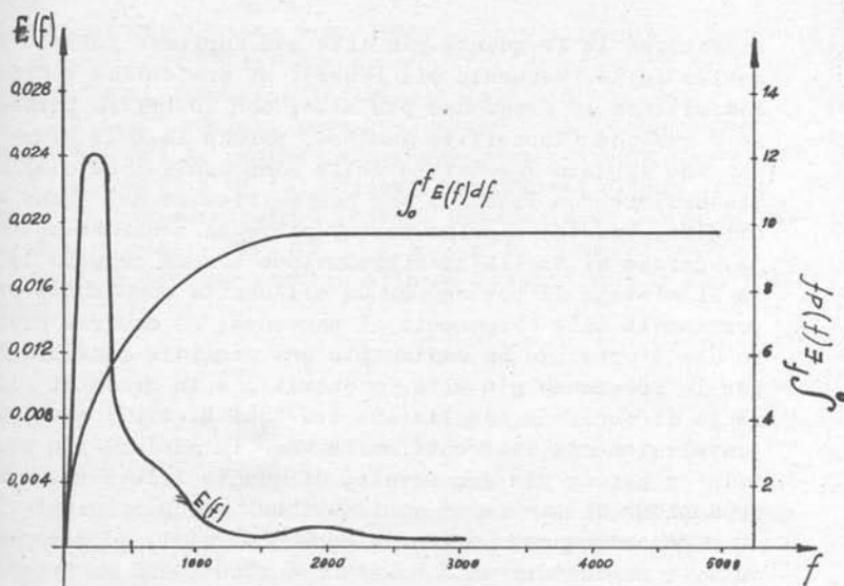


fig.44 - Distribuzione delle componenti della voce umana.

(canali radiofonici di 9000 Hz), il quale, tuttavia, è lungi dal soddisfare le esigenze artistiche di un orecchio raffinato.

Oggi si ha la tendenza ad aumentare la gamma telefonica tra 280 e 4000 Hz, che poi in pratica, per ottenere una ragionevole separazione dei canali, si riduce a 250 + 3600 Hz. Ciò conduce ad una minore utilizzazione dei circuiti telefonici a causa del minor numero dei canali inseparabili.

Nella riproduzione sonora, come è stato già detto, è di massima importanza contenere la distorsione non lineare, perchè l'udito è in grado di apprezzarla, specialmente sulle armoniche molto elevate, con una enorme sensibilità.

Per questa ragione si constata in molti casi pratici che, in un sistema riproduttore di voce (il quale già di per se' introduce una distorsione lineare, nel caso di

riprodurre le frequenze più alte con ampiezza inferiore a quella delle frequenze più basse), si preferisce togliere addirittura le frequenze più alte, con un filtro passa-basso o qualche dispositivo analogo, perchè in tale gamma si vengano appunto a generare delle componenti dovute alla distorsione non lineare, che non esistevano nel suono di origine. Questo, a prima vista, potrebbe sembrare un assurdo, perchè si taglia la riproduzione sonora proprio là dove il sistema di per sé non dà all'uscita componenti proporzionali alle componenti di partenza; ma occorre ricordare che l'orecchio ha mediamente una maggiore sensibilità per le frequenze più alte, e quindi, è in grado di rilevare la distorsione non lineare dei toni bassi, i quali sono prevalentemente contenuti nella voce, in maniera più sensibile e perciò più sgradevole, di quanto rilevi mancata riproduzione di toni alti contenuti nel suono originale.

Secondo questo criterio sono costruiti, ad esempio, tutti i regolatori di tonalità nei ricevitori radiofonici. Essi sono costituiti da un sistema filtrante atto ad ridurre la ampiezza delle componenti di frequenze alte, tanto più quanto più elevata è la frequenza. La frequenza alla quale questo fenomeno inizia è regolabile dall'operatore.

Si può a questo proposito, rilevare che i ricevitori radiofonici, i quali in relazione alla necessità stessa della radiodiffusione già "tagliano" enormemente tutte le frequenze superiori a 3500 e 4500 Hz, hanno le frequenze di taglio del loro regolatore di tonalità variabile entro limiti ancora più bassi: e non sono pochi gli ascoltatori che preferiscono la voce e la musica "nasale", in cui, cioè, mancano tutte le componenti di frequenza superiori al migliaio di hertz, ad una riproduzione contenente anche note relativamente alte, ma affetta da una distorsione non lineare.

In questi ultimi tempi sono stati effettuati numerosi studi sulla struttura della voce umana, i quali, tra l'altro, hanno condotto ad una rappresentazione della voce sotto forma di disegno in bianco e nero su una striscia nella quale sulle ascisse sono i tempi, sulle ordinate le frequenze che in ogni istante sono presenti nella voce, e la intensità della colorazione di ogni elemento di superficie

di determinate ascisse e ordinate è proporzionale alla potenza specifica della componente di frequenza data dall'ordinata che si produce nell'istante dato all'ascissa.

I disegni variano poco con la persona, ma dipendono solo dalle parole pronunciate. Essi sono ottenuti con dispositivi automatici ed istantanei, e, corredati da opportune regole di interpretazione possono essere letti con sicurezza. Tali disegni (fig. 45) prendono il nome di "parola scritta", e possono servire alla educazione vocale dei sordomuti.

§ 3) Comprensibilità.

La comprensibilità è la caratteristica globale e fondamentale di un dispositivo di riproduzione sonora allorchè venga usato per la trasmissione della voce umana.

La comprensibilità può essere anche limitata ad una sola parte del circuito, purchè questo sia collegato alle rimanenti parti le quali abbiano una riproduzione perfetta, cioè non introducano alcun abbassamento della comprensibilità.

La comprensibilità può essere grossolanamente preveduta in base alle curve di risposta e di distorsione non lineare ma in sostanza, è determinabile con precisione solo attraverso prove pratiche soggettive a carattere statistico.

Affinchè anche le prove ad udito abbiano un certo grado di attendibilità, ripetibilità e siano esprimibili con numeri, si usa fare trasmissioni di sillabe (logatomi) appartenenti alla lingua del luogo, senza alcuna connessine logica, ma piuttosto con le sillabe contigue assonanti. Durante la prova si permutano tra loro gli operatori in modo da compensare eventuali difetti di pronuncia o di cadenza. La percentuale delle sillabe correttamente ricevute, rispetto alle trasmesse, dà la comprensibilità ai logatomi e, per una data lingua, tale percentuale di comprensibilità è in relazione con la percentuale di comprensibilità alle parole ed alle frasi.

In tabella IV è indicata una serie di logatomi della lingua italiana.

Può essere rilevata la variazione della percentuale di comprensibilità ai logatomi allorchè si sopprimano nella riproduzione, con un filtro passa-basso, le componenti a frequenza superiore ad una certa frequenza di taglio; oppure si sopprimono con un filtro passa-alto, le componenti a frequenza superiore ad una certa frequenza di taglio.

Le curve della comprensibilità logatomica sono riportate in fig. 46. Le ordinate della curva A danno la comprensibilità ai logatomi quando sono soppresse tutte le componenti di frequenze inferiori all'ascissa; le ordinate della curva B danno la comprensibilità logatomica quando manchino le componenti di frequenza superiore all'ascissa.

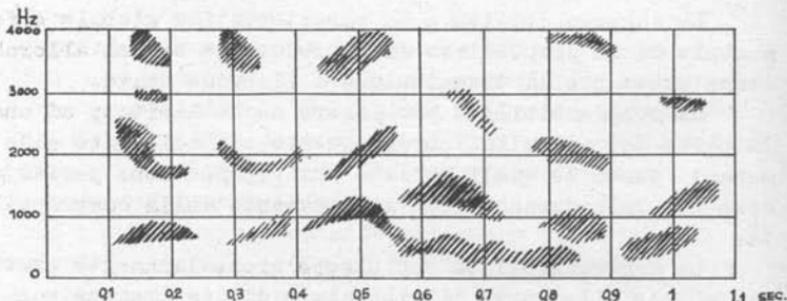


fig.45

Si vede dal diagramma che la soppressione delle componenti della voce al disotto di 600 Hz, che riduce notevolmente l'intensità, non diminuisce sostanzialmente la comprensibilità logatomica, mentre la soppressione delle componenti della voce oltre 600 Hz non riduce sostanzialmente il volume di voce, ma abbassa la comprensibilità ai logatomi al 10 %/o circa.

Nella lingua inglese sono stati determinati sperimentalmente dei diagrammi in cui la comprensibilità probabile alle parole è riportata in funzione della comprensibilità logatomica con parametro il numero dei logatomi che compongono o-

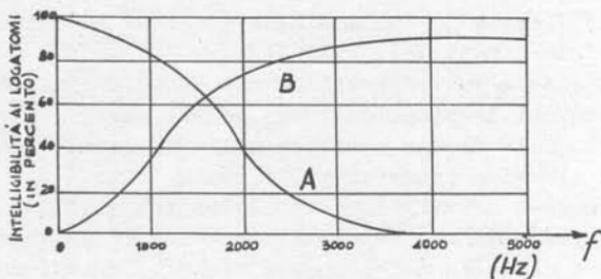


fig.46

Tabella IV

BRA	VLE	PRU	FO	MIE
CRA	CLE	PU	SFO	MEI
TRA	SCLE	SPU	TO	MIEI
PRA	SCLIE	SMU	STIO	NEI
FRA	SCRE	SU	SFO	MEIE
SFA	GLE	MI	STO	NIEI
STA	PLE	SMI	STUO	NEI
SCA	CI	SNI	STU	CEI
SLA	CHI	NI	TU	CRE
SPLA	GHI	MI	VU	GRE
SCLA	GLI	MIE	SVU	VE
SCHIA	LI	AL	ZU	ZE
SMA	LU	BAL	SBU	ZEI
SGNA	BLU	PAL	QUI	SEI
SGRA	CLU	BRAL	QUE	ZIE
		RAL	GUE	ZI

gni parola (fig.47). Nella lingua italiana non sono stati ancora determinati tali grafici.

Da queste curve si rileva che anche una modesta compressione dei logatomi dà luogo ad una sufficiente comprensibilità alle parole connesse nella parlata, cioè alle frasi, ove il senso opera un validissimo aiuto.

Non deve meravigliare che la comprensibilità della parola composta di una sola sillaba (cioè di un logatomo) sia superiore a quella dei logatomi stessi. Infatti mentre i logatomi sono slegati e senza senso, le parole di un solo logatomo sono parole esistenti nella lingua e quindi ne resta più facile l'individuazione.

In fig. 48 è indicata la "qualità" di una riproduzione musicale empirica soggettiva in funzione della frequenza di taglio. La curva A dà la qualità allorchè si sopprimono le componenti di frequenza inferiore all'ascissa; la curva B allorchè si sopprimono tutte quelle di frequenza superiore all'ascissa.

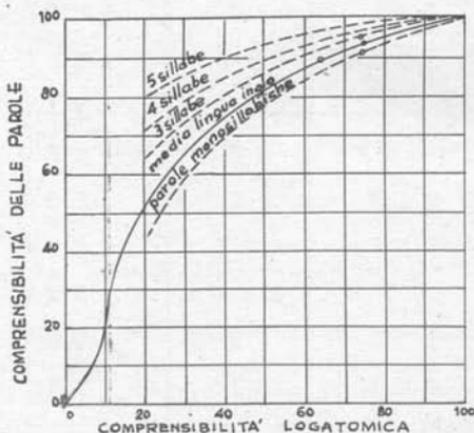


fig.47

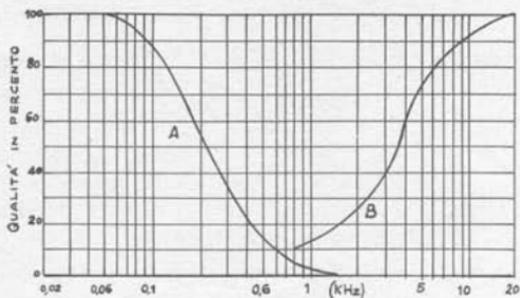


fig.48 - "Qualità" di una riproduzione orchestrale in funzione della gamma di frequenza riprodotta.

o o o o o o o o
o o o o
o o
o

Capitolo VI

PROPRIETA' DIRETTIVE



§ 1) - Caratteristiche di direttività.

Col nome di proprietà direttive si intendono le caratteristiche della distribuzione del campo sonoro generato da una o più sorgenti sonore della stessa frequenza.

Tali proprietà sono comuni a tutti i fenomeni ondulatori i quali possono essere trattati da un punto di vista anche formalmente diverso, come accade, per esempio, per l'ottica nello studio delle interferenze e della diffrazione. Viceversa, l'esistenza di queste proprietà è una indicazione per stabilire con sicurezza che il fenomeno in questione è appunto di carattere ondulatorio.

Se si ha una sorgente sonora sotto forma, per esempio, di una sferetta puntiforme pulsante in un mezzo indefinito, essa, genera una pressione p e dà luogo ad una velocità q che, come è noto, ad una certa distanza dalla sorgente è legata a p con una legge di proporzionalità. Se il mezzo non è in quiete, ma è già percorso da un'onda sonora della stessa frequenza di quella generata dalla sorgente predetta, la pressione sonora p in ogni punto del mezzo si somma vettorialmente con quella p_1 relativa all'onda sonora persistente. L'onda sonora migrante che già esiste nel mezzo reagisce sulla sorgente sonora in un modo che

*quali fattori
contribuiscono
all'effetto di
risultato di
sintonia
Dicono che
le dimensioni
dell'ostacolo
sono v. l.*

dipende dai valori di p e p_1 e della differenza di fase fra l'onda sonora in quel punto e la pulsazione della sorgente.

Nei riguardi della sorgente sonora ciò equivale ad una variazione della resistenza acustica del mezzo, in cui è immersa, che non è il caso qui di andare ad investigare.

Due o più sorgenti reali o virtuali disposte in un mezzo indefinito e vibrante alla stessa frequenza reagiscono vicendevolmente l'una sull'altra, ed, in prima approssimazione, il campo sonoro in ogni punto è quello che si ottiene dalla somma vettoriale delle pressioni sonore generate dalle sorgenti, considerate singolarmente nel mezzo in quiete.

La emissione e la ricezione sonora possono essere trattate contemporaneamente, poichè si può dimostrare che la potenza irradiata da un sistema emittente comunque costituito entro un piccolo angolo solido attorno ad una determinata direzione, e quella ricevuta da un sistema ricevente di dimensioni geometriche identiche a quelle del sistema emittente, proveniente da una sorgente sonora posta nel punto allo infinito in una determinata direzione, dipendono con la stessa legge dalla direzione (legge di reciprocità). La "caratteristica" di emissione e la "caratteristica" di ricezione sono fra di loro uguali.

La dipendenza della emissione dalla direzione è dovuta al fatto che i treni d'onda che provengono dai singoli elementi del complesso radiatore vibranti in fase, arrivano su di uno stesso fronte d'onda in tempi diversi e cioè con fasi diverse, per le diverse direzioni. La dipendenza della ricezione dalla direzione dell'onda sonora incidente si basa sul fatto che i singoli elementi di un sistema ricevente sono colpiti dal fronte d'onda in tempi diversi, cioè sono eccitati con fase diversa.

E' perciò chiaro che un radiatore che abbia piccola estensione rispetto alla lunghezza d'onda del suono emesso o ricevuto, non danno luogo a differenze di fase apprezzabili, è adirettivo, cioè esso si comporta praticamente come se fosse un radiatore sferico.

Un caso particolare di ricevitore con proprietà direttive si ha nel sistema ricevente a due elementi che costitui-

sce l'udito.

Nelle applicazioni navali della elettroacustica, le proprietà direttive vengono utilizzate nella segnalazione subacquea, nella ricezione idrofonica, nella ricerca ecconiométrica, ecc..

Il sistema emittente o ricevente può essere puntiforme, "discontinuo", cioè costituito da tanti elementi di dimensioni piccole rispetto alla lunghezza d'onda del suono, cioè singolarmente adirettive, ma posti a distanza mutue non trascurabili di fronte alla lunghezza d'onda stessa; oppure può essere continuo, cioè composto da uno solo elemento di dimensioni geometriche non trascurabili rispetto alla lunghezza d'onda.

Si intende per caratteristica naturale di un sistema ricevente il diagramma polare che dà l'ampiezza della grandezza generata (generalmente elettrica) lasciando fermo il sistema e variando, rispetto ad esso, la direzione di provenienza del suono, cioè in funzione dell'angolo che forma questa direzione di provenienza con una direzione di riferimento fissa col sistema.

Si intende per caratteristica naturale di un sistema emittente il diagramma polare che dà, a parità di eccitazione del sistema, l'ampiezza della pressione sonora in funzione dell'angolo che determina la direzione considerata rispetto ad una di riferimento fissa con il sistema.

Si supponga di avere un sistema discontinuo di ricevitori di suono e di dare alla grandezza alternativa generata da ciascuno di essi uno sfasamento funzione della "posizione" che il ricevitore occupa rispetto ad un orientamento di riferimento, e quindi di sommare vettorialmente le grandezze così sfasate.

Si ammetta che siano determinati tutti gli sfasamenti da introdurre, attraverso un algoritmo funzione della disposizione degli elementi del sistema, con un solo parametro angolare che prende il nome di angolo di sfasamento.

Analogamente, nel caso di un sistema di emittitori si dà alla grandezza alimentatrice di ciascun elemento uno sfasamento funzione della posizione dell'elemento stesso, si definisce caratteristica artificiale il diagramma polare della pres

sione sonora in una certa direzione, tenendo fisso il sistema e la direzione e variando l'angolo di sfasamento (oppure: tenendo fisso il sistema e l'angolo di sfasamento e variando la direzione) in funzione dell'angolo di sfasamento (oppure: in funzione della direzione di emissione del suono).

A parità di energia totale erogata, una radiazione direttiva permette una concentrazione di energia in certi settori piuttosto che in certi altri, dando luogo ad una maggiore densità di energia là dove essa viene utilizzata, a scapito dell'energia erogata entro altri settori nei quali la trasmissione (o la sensibilità alla ricezione) esiste in misura modesta.

Le emissioni o ricezioni direttive hanno quindi, a parità di energia in giuoco e di altre condizioni, il vantaggio di una maggiore portata dell'impianto, e di interessare sole limitati settori.

§2) - Sistema di due elementi puntiformi.-

Si voglia determinare la caratteristica naturale di due elementi ad esempio emettitori adirettivi di suono, posti alla distanza \underline{d} , i quali, vibrando sinoidalmente in fase, generino presi singolarmente pressione sonora di valore efficace p uguale in tutte le direzioni. Si supponga che tali sorgenti sonore siano eccitate per via elettrica. In un punto A ad una distanza grande dai due elementi rispetto a \underline{d} , nella direzione formante l'angolo α con la congiungente (fig.49), si ha una pressione risultante p_α somma vettoriale delle due pressioni p generate da ciascun emettitore. La distanza tra i fronti d'onda delle due onde provenienti dai due emettitori, è $d \cos \alpha$, a cui corrisponde uno sfasamento 2φ definito dalla relazione:

$$\frac{d \cos \alpha}{\lambda} = \frac{2\varphi}{2\pi}$$

$$\gamma = \frac{1}{T}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\gamma$$

$$\lambda \gamma = c$$

$$\lambda \frac{\omega}{2\pi} = c$$

$$2\varphi = \frac{2\pi d \cos \alpha}{\lambda} = \frac{\omega d}{c} \cos \alpha ; \quad (\text{VI-I})$$

in cui λ , ω e c hanno i soliti significati. La caratteristica naturale è data dalla risultante p_α (fig.50):

$$p_\alpha = 2p \cdot \cos \left(\frac{\pi d}{\lambda} \cos \alpha \right) = 2p \cos \varphi . \quad (\text{VI-2})$$

Si vede subito che per $\alpha = \frac{\pi}{2}$, cioè per una direzione normale agli emettitori la risultante p_α , qualunque sia d , è sempre uguale a $2p$.

Se si vuole però che, per $\alpha = 0$ od $\alpha = \pi$ cioè secondo i due sensi della congiungente gli elementi, la emissione sia nulla, occorre che sia:

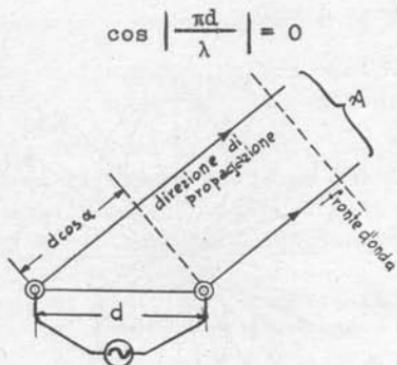


fig.49

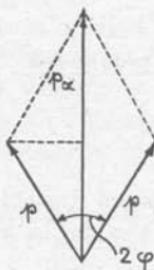


fig.50

$$\frac{\pi d}{\lambda} = k \frac{\pi}{2}, \text{ (con } k \text{ dispari),}$$

$$d = k \frac{\lambda}{2} \quad \text{(VI-3)}$$

Il caso più semplice in cui ciò viene realizzato si ha quando $k = 1$, cioè la distanza d degli elementi è pari a mezza lunghezza d'onda.

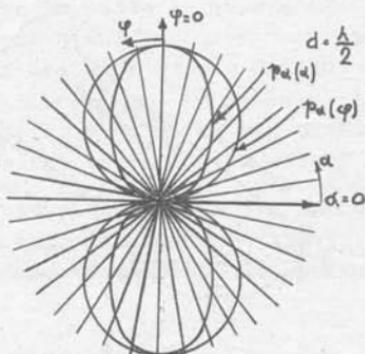


fig.51

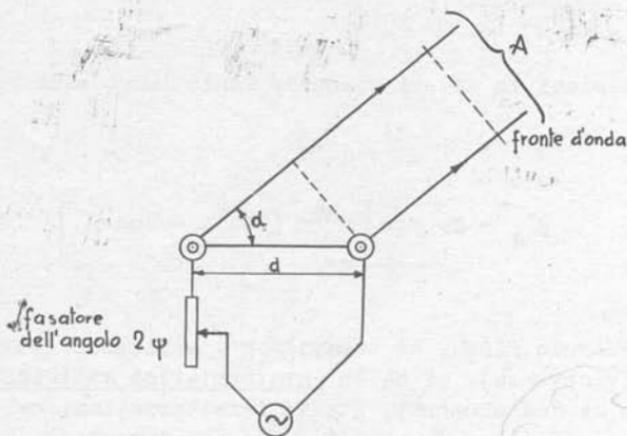


fig.52

Se questa condizione è realizzata, l'equazione della caratteristica naturale è, per la (VI-2):

$$p_a = 2p \cos \left(\frac{\pi}{2} \cos \alpha \right) = 2p \cos \varphi . \quad (VI-4)$$

La risultante p_a in funzione di $\varphi = \frac{\pi}{2} \cos \alpha$ è rappresentata da un diagramma polare costituito da due cerchi in opposizione, mentre p_a in funzione di α risulta invece formato da due lobi in opposizione (fig.51).

Il grafico si riferisce al piano del disegno, la caratteristica naturale nello spazio si ottiene ruotando la sezione generatrice intorno alla congiungente i due elementi.

Se gli elementi emettitori sono eccitati elettricamente (fig.) con una differenza di fase:

$$2\psi = 2\pi d \cos \gamma , \quad (VI-5)$$

le pressioni in A si sommano, dando luogo alla risultante:

$$P_{aY} = 2p \cos \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\cos \alpha - \cos Y) \right]. \quad (\text{VI-6})$$

Tenendo fisso, ad esempio α , e ponendo variabile Y (o viceversa), si ha la caratteristica artificiale del gruppo di due elementi. Questa caratteristica, nel caso particolare di $\alpha = \pi/2$, e facendo corrispondere φ a ψ , è ancora costituito da due cerchi di opposizione, sovrapposti a quelli della caratteristica naturale, e ovviamente facendo corrispondere α a Y , si hanno ancora gli stessi casi della caratteristica naturale.

L'angolo Y è puramente teorico, ricavabile analiticamente dalla (VI-5) il quale corrisponde all'angolo effettivamente esistente α ; mentre ψ è l'angolo di sfasamento realmente inserito che subisce la grandezza alternativa di alimentazione, il quale corrisponde all'angolo teorico φ dato dalla (VI-1). *questo è un altro angolo teorico, sull'altra*

Generalmente, nelle questioni di direttività, si pone l'ampiezza del vettore generato da ogni elemento del sistema inversamente proporzionale al numero degli elementi in gioco, così da rendere la massima ampiezza del diagramma direttivo uguale all'unità.

Nel caso presente, trattandosi di due soli elementi è $p = 1/2$.

§3) - Sistema disposto su base lineare.

Si chiama base la linea geometrica avviata sulla quale sono disposti gli elementi trasmettitori o rivevitori. Si consideri adesso n elementi su una retta (base lineare) disposti, per semplicità, ad una distanza d uguale tra di loro; come è indicato in figura 53.

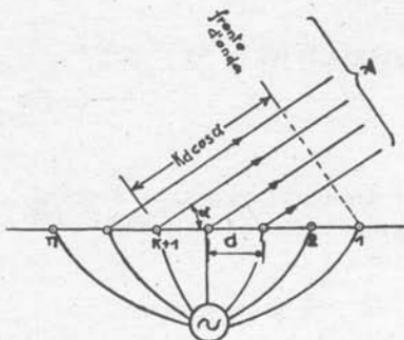


fig.53

Si indichi con $1/n$ l'ampiezza della pressione sonora generata da ognuno (nel caso di ricevitori sia $1/n$ il valore massimo della grandezza generata da ciascuno di essi). Scegliendo opportunamente l'origine dei tempi, si ha all'istante t , per il 1°, 2°, 3°, n° elemento, sullo stesso fronte d'onda, rispettivamente:

note: in fase, differenza fasi e conda e \$\Sigma\$. addizione delle fasi in Stehette e conda

$$\frac{1}{n} e^{j\omega t}, \frac{1}{n} e^{j\omega(t + \frac{d \cos \alpha}{c})}, \frac{1}{n} e^{j\omega(t + \frac{2d \cos \alpha}{c})}, \dots, \dots, \frac{1}{n} e^{j\omega(t + \frac{(n-1)d \cos \alpha}{c})}.$$

od anche, ricordando che $\varphi = \frac{\omega d \cos \alpha}{2c}$, si ha :

$$\frac{1}{n} e^{j\omega t}, \frac{1}{n} e^{j\omega t + 2\varphi}, \frac{1}{n} e^{j\omega t + 4\varphi}, \dots, \frac{1}{n} e^{j\omega t + 2(n-1)\varphi}.$$

La somma di questi n addendi dà in grandezza e fase la risultante p_a cercata.

$$p_a = \sum_{k=1}^n \frac{1}{n} e^{j[\omega t + 2(k-1)\varphi]} = \frac{1}{n} e^{j\omega t} \sum_{k=1}^n e^{j2(k-1)\varphi}$$

La sommatoria indicata riguarda i primi n termini di una progressione geometrica di ragione $e^{j2\varphi}$ il cui primo termine è 1; perciò:

$$p_a = \frac{1}{n} e^{j\omega t} \frac{e^{j2n\varphi} - 1}{e^{j2\varphi} - 1}$$

Trasformando l'espressione esponenziale in espressione trigonometrica; si ottiene:

$$p_a = \frac{1}{n} e^{j\omega t} e^{-j(n-1)\varphi} \frac{\text{sen } n\varphi}{\text{sen } \varphi} = \frac{\text{sen } n\varphi}{n \text{sen } \varphi} \cdot e^{j[\omega t - (n-1)\varphi]}$$

modulo 1
(VI-7)

$$p_a = \left| \frac{\text{sen } n\varphi}{n \text{sen } \varphi} \right| \quad (\text{VI-8})$$

Dalla (VI-7) si constata che la risultante p_a è di ampiezza $\frac{\text{sen } n\varphi}{n \text{sen } \varphi}$, e sfasata rispetto alla grandezza generale del primo elemento di $(n-1)\varphi$.

La risultante p_a ha massimi uguali ad 1 per $\varphi = 0$ e $\varphi = \pi$, che prendono il nome di massimi principali e tra questi vi sono altri $n - 2$ massimi secondari di φ solu-

*stesse figure di
statistica serie armoniche*

zioni della equazione trascendente:

$$\frac{\partial p_{\alpha}}{\partial \varphi} = 0 ;$$

cioè:

$$n \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} n\varphi .$$

Bisogna tenere ben presente la distinzione tra l'aspetto del diagramma di p_{α} riportato in funzione di φ , e riportato in funzione di α .

Il diagramma polare di p_{α} in funzione di φ si compone di $2(n-1)$ lobi (fig. 54). Se si riporta invece p_{α} in funzione di α , si vede che all'aumentare di wd , od in altre parole, al crescere di d/λ aumenta il numero dei lobi; e precisamente si hanno massimi principali uguali a 1, in numero $4i$, se i è intero inferiore del rapporto d/λ ($4i - 2$) se d/λ è proprio uguale ad i , separati da $n-2$ massimi secondari.

L'angolo φ è teorico, definito dalla (VI-1); il cui valore dipende da λ , d ed α ; ed il diagramma polare p_{α} di un sistema lineare in funzione di φ dipende solamente dal numero n degli elementi; quindi tale diagramma resta ben determinato e costante per ogni determinato numero di elementi. Per contro α è l'angolo reale che fa la direzione di propagazione considerata con una retta di riferimento fissa sulla base, ed il diagramma polare p_{α} del sistema in funzione di α , dipende da n , λ e d .

Le caratteristiche naturali di uno stesso gruppo in funzione di φ e di α non coincidono mai, hanno solo lo stesso numero di lobi, e precisamente n , quando $d = \lambda/2$ (fig. 54). Se $d = \lambda$ il diagramma in funzione di φ resta invariato mentre in funzione di d è rappresentato,

nel caso di 6 elementi, in fig. 55. Se $d = \frac{3\lambda}{2}$, la caratteristica naturale in funzione di φ rimane ancora invariata, mentre in funzione di α è rappresentata in figura 56, e così via.

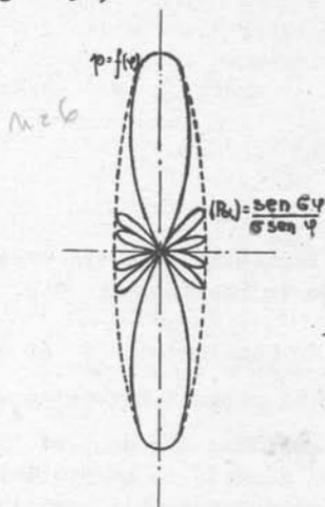


fig.54

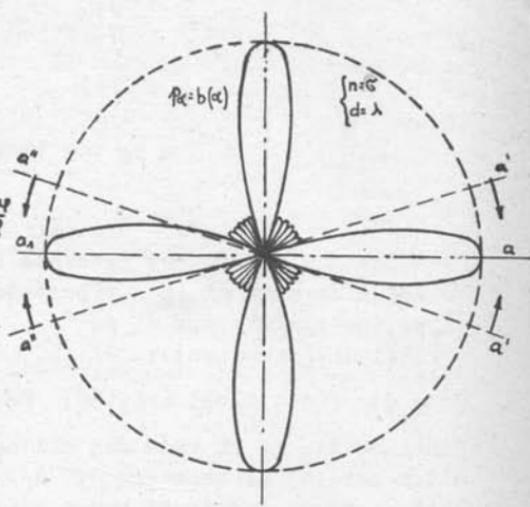


fig.55

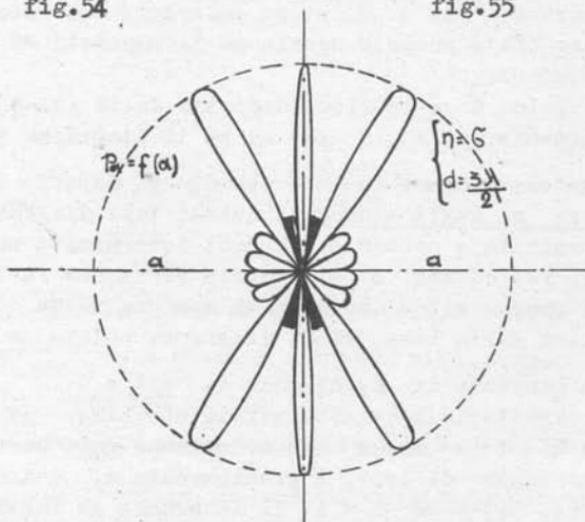


fig.56

Si hanno sempre due massimi principali per $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ed $\alpha = \frac{3\pi}{2}$ in ogni caso; inoltre si possono avere altri massimi principali tutte le volte che il valore di α è tale da rendere $\varphi = \frac{\pi d}{\lambda} \cos \alpha$ multiplo di π .

Si può dimostrare che, se si vuole realizzare la condizione limite per la quale non vi siano altri lobi principali oltre quelli per $\alpha = \pi/2$ ed $\alpha = 3\pi/2$, occorre che gli zeri in corrispondenza delle semirette a' , a'' vadano ad adagiarsi in corrispondenza della semiretta \underline{a} della base, e gli zeri in corrispondenza delle semirette a'' , a'' vadano a riunirsi sulla semiretta a_1 .

Come si potrebbe ricavare dallo studio dell'equazione trascendente (VI-8):

$$\frac{\text{sen } n\varphi}{n \text{ sen } \varphi} = 0$$

sono realizzate queste condizioni quando si abbia:

$$|\varphi| \leq \frac{\pi(n-1)}{n} ;$$

e, per $\alpha = 0$ ed $\alpha = \pi$, si ottiene:

$$\frac{d}{\lambda} \leq \frac{n-1}{n} \quad (\text{VI-9})$$

Quando la (VI-9) è soddisfatta, si ha una sola coppia di lobi principali della caratteristica naturale in funzione di α . Fissata la minima lunghezza d'onda del suono in questione, disuguaglianza (VI-9) dà un limite superiore per la distanza d tra gli elementi.

Per questo limite i due lobi principali di radiazione sono molto acuti; al diminuire di d i lobi secondari tendono a diminuire di numero, mentre i due lobi principali posti in opposizione, pur rimanendo di ampiezza unitaria, si allargano sempre di più.

Per avere una radiazione molto direttiva, cioè, rimanendo costante l'intensità massima di emissione, per avere potenza irradiata minima, converrebbe soddisfare alla condizione di uguaglianza (VI-9); ma questo porterebbe per conseguenza un valore di d assai elevato, poco inferiore a λ , che può essere in pratica sconsigliabile per ragioni di ingombro. In molti casi si fa $d = \lambda/2$, rinunciando così ad una caratteristica naturale molto acuta, ma attuando un ingombro più modesto.

Si supponga adesso di dare degli sfasamenti alle grandezze elettriche eccitatrici dei singoli elementi (od alle grandezze alternative generate dagli elementi, se si tratta di ricevitori) proporzionali al posto occupato da ogni elemento. Sia ψ l'angolo di sfasamento tra due elementi contigui, tale che $2\psi = \frac{wd \cos \gamma}{c}$, ove γ è un angolo

teorico da confrontarsi con l'angolo fisicamente esistente α .

L'equazione della caratteristica artificiale si ricava immediatamente dalla (62) e precisamente:

$$P_{\alpha, \gamma} = \left[\frac{\text{sen} \left[\frac{wd}{2c} (\cos \alpha - \cos \gamma) \right]}{n \text{sen} \left[\frac{wd}{2c} (\cos \alpha - \cos \gamma) \right]} \right] \quad (\text{VI-10})$$

Per $\alpha = \frac{\pi}{2}$ la caratteristica artificiale $p_{\pi/2, Y}$ coincide con la caratteristica naturale p_{α} , quando si faccia corrispondere all'angolo Y della caratteristica artificiale, l'angolo α della caratteristica naturale.

Per evitare la presenza di altri massimi principali, oltre a quelli per cui $Y = \alpha$, dallo studio della relazione precedente, si ricava con un procedimento, che non riportiamo, la disuguaglianza:

$$\frac{\theta}{\lambda} \leq \frac{n-1}{2n} \quad (\text{VI-11})$$

Al variare di α , varia l'acutezza dei lobi della caratteristica artificiale, e ciò significa che si ha variazione della direttività della emissione in funzione dell'angolo α che forma la direzione di propagazione con la retta della base.

Questo inconveniente, peraltro intuitivo per la dissimmetria della base nelle diverse direzioni, non può ridursi aumentando il numero degli elementi, quantunque aumentino corrispondentemente le acutezze dei lobi per tutte le direzioni. Esso invece praticamente non sussiste con un sistema di elementi disposti su base circolare, con un numero sufficiente di elementi.

Un segmento radiante di lunghezza l può considerarsi come caso limite di un sistema lineare ove $n \rightarrow \infty$, $d \rightarrow 0$ ed $nd \rightarrow l$.

Dalla (VI-8) si ricava:

$$p_{\alpha} = \frac{\text{sen } n\varphi}{n \text{ sen } \varphi} \simeq \frac{\text{sen } n\varphi}{n\varphi} \quad (\text{VI-12})$$

$$p_a \approx \frac{\text{sen} \frac{\omega l \cos \alpha}{2c}}{\frac{\omega l \cos \alpha}{2c}}$$

cioè del tipo: seno di angolo diviso per l'angolo stesso.

La variazione della direttività della caratteristica artificiale in funzione di α è la ragione per cui il sistema di elementi su base lineare viene scartato tutte le volte che ciò sia possibile.

§ 4) - Sistema disposto su base circolare.-

Si considerino $n = 2m$ elementi adirettivi uniformemente su di un cerchio di diametro d e si pongano gli assi ortogonali x, y in modo che l'asse Ox passi per il primo elemento (fig. 57).

Per fissare le idee si supponga qui di avere a che fare con elementi ricevitori di suono; ma, com'è noto, la trattazione rimane assolutamente identica nel caso che si tratti di elementi trasmettitori.

Il suono proveniente dalla direzione segnata in figura che forma con l'asse x l'angolo α contato nel senso positivo delle rotazioni, incontra gli elementi opposti $(k+1)^{mo}$ e $(m+k+1)^{mo}$ con differenza di fase; e la somma $r_{k,a}$ delle due grandezze ricevute è:

al fine, + arriva in centro

$$r_{k,a} = \frac{1}{n} \cos \omega \left(t - \frac{OA}{c} \right) + \frac{1}{n} \cos \omega \left(t + \frac{OA}{c} \right) ,$$

$$r_{k,a} = \frac{1}{m} \cos \omega t \cos \frac{\omega OA}{c} . \quad (VI-13)$$

dove OA è la proiezione del raggio vettore $O(k+m+1)$ sulla direzione (positiva) di propagazione. Se x_{k+1} e y_{k+1} sono le coordinate dell'elemento $(k+1)^{mo}$, e $\frac{\pi k}{m}$ l'angolo $xO(k+1)$ che forma la $O(k+1)$ con l'asse delle x , contato nel senso positivo delle rotazioni, si ha:

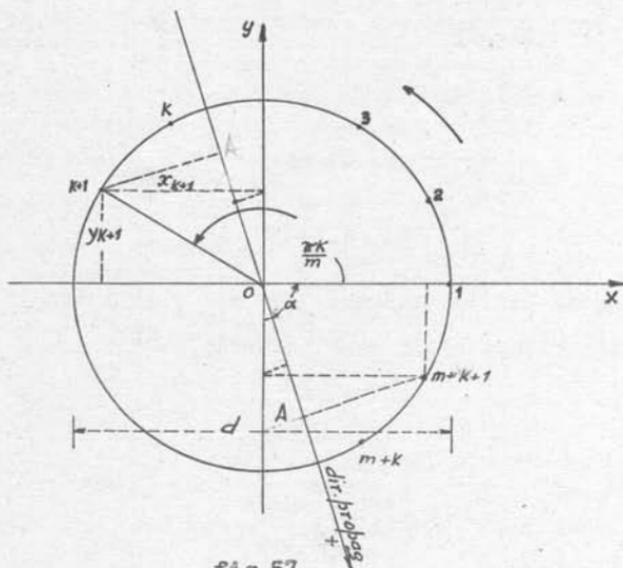


fig.57

$$x_{k+1} = \frac{d}{2} \cos \frac{\pi k}{m}, \quad y_{k+1} = \frac{d}{2} \sin \frac{\pi k}{m}$$

inoltre:

$$OA = x_{k+1} \cos \alpha - y_{k+1} \sin \alpha,$$

dove il senso positivo di OA è quello della propagazione,

segnato come in figura. sostituendo:

$$OA = \frac{d}{2} \cos \left(\alpha + \frac{\pi k}{m} \right) .$$

Se si sostituisce questo valore nella (VI-13), si ottiene:

$$r_{k,a} = \frac{1}{m} \cos \omega t \cos \left[\frac{\omega d}{2c} \cos \left(\alpha + \frac{\pi k}{m} \right) \right] ,$$

e sommando aritmeticamente le $r_{k,a}$ di tutte le coppie di ricevitori, si ha la risultante di ampiezza:

$$p_a = \frac{1}{m} \sum_0^{m-1} \left[\cos \left[\frac{\omega d}{2c} \cos \left(\alpha + \frac{\pi k}{m} \right) \right] \right] . \quad (VI-14)$$

Questa sommatoria è stata calcolata da Fischer, ed equivale alla sommatoria seguente:

$$p_a = J_0 \left(\frac{\omega d}{2c} \right) + 2 \sum_1^{\infty} (-1)^{pm} J_{pm} \left(\frac{\omega d}{2c} \right) \cos(np\alpha) , \quad (VI-15)$$

dove $J_0 \left(\frac{\omega d}{2c} \right)$ ed $J_{pm} \left(\frac{\omega d}{2c} \right)$ sono le funzioni di prima specie di Bessel della quantità $\frac{\omega d}{2c}$, rispettivamente di ordi-

ne zero e $(pm)^{mo}$. Dallo studio di questa relazione, si potrebbe vedere che il termine generale della sommatoria indicata tende a zero, e che termine $J_0\left(\frac{\omega d}{2c}\right)$, indipendente da α , per una scelta opportuna di n e di d può divenire preponderante rispetto al valore della sommatoria la quale invece è funzione di α . Si può porre il quesito di determinare \underline{n} e \underline{d} affinché la sommatoria, funzione di α , risulti minore di una determinata frazione del termine indipendente da α ; o, in altre parole, affinché la caratteristica naturale del gruppo circolare sia praticamente poco pendente da α , riducendosi così, in coordinate polari, circa ad un cerchio (fig.59), con fluttuazioni che hanno il ritmo della successione degli elementi.

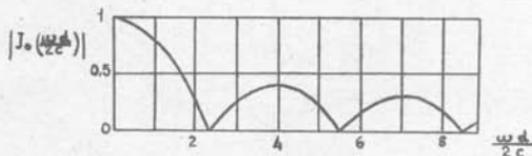


fig.58

Fissato un valore di $\frac{\omega d}{2c}$ (o di $\frac{d}{\lambda}$), per esempio con la condizione di non avere massimi secondari dovuti alla J_0 (fig.58), si può imporre che il valore della sommatoria non superi ad esempio il 7 % del valore del termine indipendente da α , $J_0\left(\frac{\omega d}{2c}\right)$. Ne risulterebbe dallo studio della (VI-15), che occorrerebbe disporre sulla base circolare un numero \underline{n} di ricevitori, tali che

$$n \geq \frac{\omega d}{2c} + 2 \quad (VI-16)$$

La variazione del 7% dell'ampiezza equivale a meno di

1 dB (esattamente è 1 dB = 12 °/°), e quindi, al limite di percezione in un controllo auditivo.

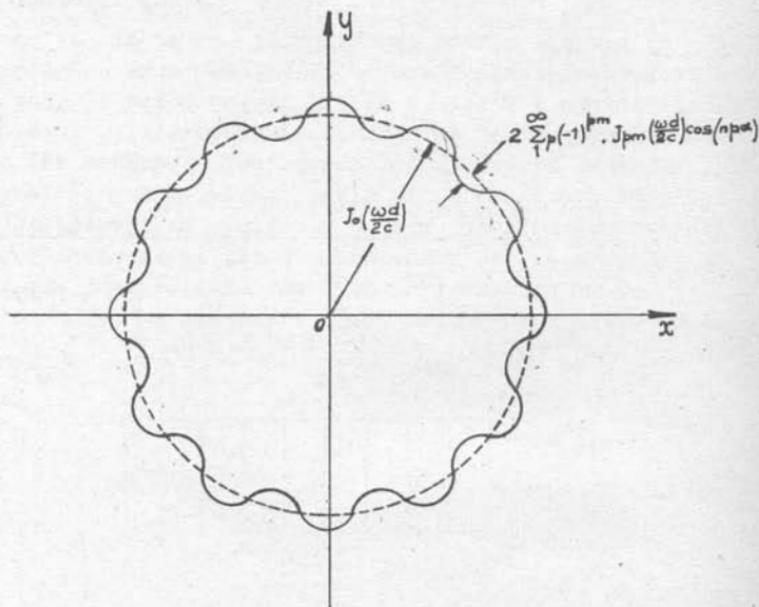


fig.59

Un ulteriore aumento di ricevitori non avrebbe, per quel valore di d/λ , efficacia apprezzabile.

Se alle grandezze generali in ciascun elemento si danno sfasamenti che compensino le loro differenze di fase se il suono proviene da una determinata direzione (di compensazione), (fig.60), in modo analogo a quanto fatto sulla base lineare, si ha quando il suono effettivamente proviene da questa direzione, uguaglianza di fasi della grandezza all'uscita. Tale direzione di compensazione può essere fatta ruotare nel piano, variando convenientemente gli sfasamenti esterni inseriti, che sono espressi dagli angoli rispettivamente:

$$\gamma, \gamma + \frac{\pi}{m}, \gamma + \frac{2\pi}{m}, \dots, \gamma + \frac{4\pi}{m}, \dots, \gamma + \frac{(m-1)\pi}{m}$$

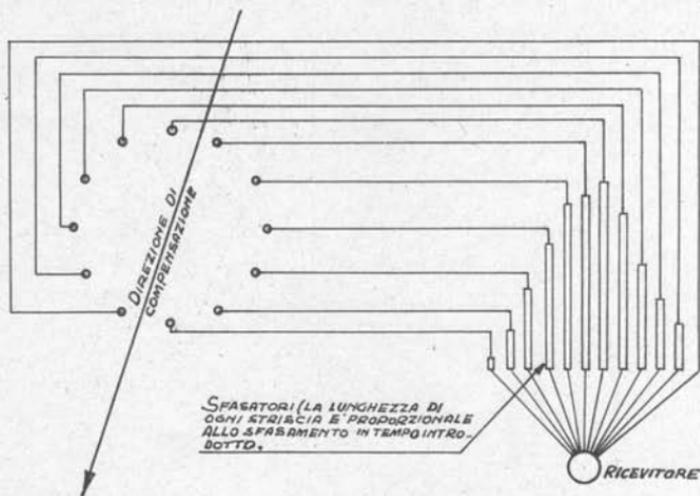


fig.60

Questi angoli sono legati a quelli effettivamente formati dalla direzione di compensazione con le congiungenti le rispettive coppie diametrali di ricevitori contati nel senso positivo delle rotazioni.

Stenzel ha studiato questo problema, ed ha ottenuto l'espressione della caratteristica artificiale, che è:

$$\begin{aligned}
 P_{\alpha, \gamma} = & J_0 \left(\frac{\omega d}{c} \operatorname{sen} \frac{\gamma - \alpha}{2} \right) + \\
 & + 2 \sum_1^{\infty} J_p J_{pn} \left(\frac{\omega d}{c} \operatorname{sen} \frac{\gamma - \alpha}{2} \right) \cos \left(\frac{\alpha + \gamma}{2} \right) np. \quad (\text{VI-17})
 \end{aligned}$$

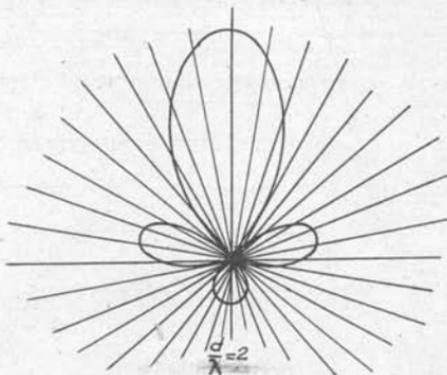


fig. 61

Il valore della sommatoria diminuisce aumentando n e diminuendo $\frac{wd}{c}$ e si può renderlo più piccolo di una determinata frazione di $J_0\left(\frac{wd}{c} \operatorname{sen} \frac{Y-\alpha}{2}\right)$, in modo da poterlo praticamente trascurare rispetto a quest'ultimo. La caratteristica artificiale del gruppo circolare diviene allora funzione della differenza tra α e Y e non del valore assoluto di questi; in altre parole per qualsiasi α si ha sempre lo stesso andamento dell'intensità di ricezione di Y con un massimo principale per $\alpha = Y$, cioè la caratteristica artificiale rimane la stessa qualunque sia α .

Ciò rappresenta il vantaggio principale che hanno i sistemi su base circolare rispetto a quelli su base lineare, nei quali invece la caratteristica artificiale, come si è visto, dipende dall'angolo α che la direzione di propagazione fa con la retta della base.

Considerando il lobo principale della caratteristica $J_0\left(\frac{wd}{c} \operatorname{sen} \frac{Y-\alpha}{2}\right)$ si vede (fig. 58) che esso raggiunge lo zero quando:

$$\frac{wd}{c} \operatorname{sen} \frac{Y-\alpha}{2} = 2,4 \quad ; \quad (\text{VI-18})$$

cioè per scarti $|\alpha - \gamma|$ definiti da questa relazione, essendo \underline{n} così elevato da poter trascurare i valori che assumono le funzioni di Bessel di ordine superiore $J_{pn}(2,4)$.

L'errore che si commette trascurando sempre queste funzioni è già minore del 7 % per $n = 4$; cioè il lobo principale della $r_{\alpha, \gamma}^{(n)}$ può venire rappresentato dalla sola J_0 . Inoltre è stato dimostrato che se è verificata la disuguaglianza

$$n \geq \frac{\omega d}{c} + 2, \quad (\text{VI-19})$$

tutta la caratteristica artificiale può, con lo stesso limite del 7 % dell'errore, venire rappresentata della $r_{\alpha, \gamma}^{(n)}$; quindi:

$$p_{\alpha, \gamma} = J_0\left(\frac{\omega d}{c} \operatorname{sen} \frac{\gamma - \alpha}{2}\right). \quad (\text{VI-20})$$

Stabilito il valore di $(\omega d)/c$ (o di d/λ) che (fig. 58) corrisponde ad una acutezza desiderata del lobo principale, oppure con la condizione (VI-18) che entro uno scarto $|\alpha - \gamma|$ tre direzioni di provenienza del suono e direzione di compensazione sia compreso tutto il lobo principale della caratteristica artificiale, si determina il numero \underline{n} degli elementi pari all'intero superiore di $\omega d/c + 2$.

Un ulteriore aumento del numero degli elementi, per fenomeni di mascheramento acustico, non porterebbe vantaggi apprezzabili.

In fig. 61 è riportato appunto la caratteristica artificiale $p_{\alpha, \gamma}$ di un gruppo circolare con il minimo numero di elementi \underline{n} il quale soddisfi la (VI-19) allorchè $|\alpha - \gamma| = \pi/4$.

§ 5) - Elementi puntiformi disposti comunque.

Finora si sono considerate basi di forma regolare, sulle quali erano disposti regolarmente n elementi emettitori o ricevitori sonori.

Nulla vieta di distribuire gli elementi in un modo qualsiasi, sia nel piano, che nello spazio, ed il loro insieme avra sicuramente caratteristiche direttive che però non è possibile, in generale, precalcolare.

La caratteristica naturale ha ovviamente un significato preciso, ma anche la caratteristica artificiale conserva ancora un senso fisico.

Nel caso di emettitori si è effettuata una compensazione secondo una certa direzione (direzione di compensazione) quando le grandezze alternative sinoidali che alimentano i singoli elementi (generalmente d.d.p.) sono sfasate tra di loro in modo tale che in un punto molto lontano dal gruppo, secondo questa direzione, la pressione sonora risultante è la somma aritmetica di quelle componenti.

Nel caso di ricevitori, si è effettuata una compensazione secondo una certa direzione, allorchè un suono proveniente da questa direzione da luogo, all'uscita di tutti gli sfasatori ciascuno dei quali connesso ad un ricevitore, grandezze (generalmente correnti o d.d.p.) tra loro tutte in fase. Tuttavia la disposizione completamente simmetrica degli elementi rispetto ad un punto, è intuitivamente l'unica che ha una caratteristica uniforme, nel piano.

Un caso particolare di questa disposizione è appunto la base circolare. Si potrebbe anche considerare una doppia base circolare, una base circolare con elemento al centro, ecc. sempre realizzando una caratteristica uniforme.

Anzi, è stato dimostrato che nel caso di base con elemento al centro, con una scelta opportuna del diametro della base e del numero degli elementi si può ridurre l'ampiezza dei massimi secondari a valori circa 1/100 di quello principale.

Una base di forma diversa dalla circolare con elementi disposti uniformemente non dà sempre luogo a caratteristiche artificiali meno direttive. Può aversi una maggiore od una minore direttività a seconda dei casi. Solamente si han

no diagrammi direttivi variabili con la direzione di ricezione (o di emissione) del suono; come si ha appunto nella base lineare.

Se gli elementi non giacciono, ^{nel piano,} bensì sono disposti su una curva gobba, quando le distanze degli elementi del piano sono piccole di fronte alla lunghezza d'onda, le caratteristiche naturale ed artificiale restano con buona approssimazione quelle relative al gruppo formato dalla proiezione su questo piano degli elementi stessi.

In tutti gli sviluppi precedenti si è supposto che gli elementi fossero uguali tra loro e adirettivi. Questa condizione è essenziale perchè ogni disuniformità di sensibilità o di proprietà direttive degli elementi di uno stesso gruppo ha sempre per conseguenza un aumento dell'ampiezza dei lobi principali delle caratteristiche.

Se gli elementi, sono simmetrici intorno ad un asse, e sono disposti, con i loro assi paralleli e verticali, la adirettività è quasi sempre verificata per tutte le direzioni del piano orizzontale. In certe applicazioni pratiche può però essere impossibile attuare tale disposizione; ad es. quando si devono collegare gli elementi allo scafo di un natante, che non è mai un piano orizzontale. Allora gli assi degli elementi risultano più o meno inclinati a seconda dell'andamento dello scafo poichè si devono adattare a questo, ed avendo proprietà direttiva per le direzioni che giacciono in un piano passante per il loro asse, le formule precedentemente ottenute servono solo per approssimazione. Peraltro tale approssimazione in molti casi pratici, risulta spesso sufficientemente buona.

In generale, se un sistema Σ_1 di elementi puntiformi, e quindi adirezionali, ha nello spazio una caratteristica naturale (od artificiale) $p_1 = p_1(\alpha, \beta, \gamma)$ dove α , β e γ sono gli angoli formati da una direzione generica con una terna di assi, e si sostituisce ogni elemento con elementi direzionali (o con sistemi Σ_2 direzionali, formati da elementi adirezionali, con il baricentro di ciascun sistema Σ_2 nel punto ove si trovava l'elemento originario) di caratteristica naturale (od artificiale) $p_2 = p_2(\alpha, \beta, \gamma)$,

il sistema Σ così formato ha una caratteristica $p(a, \beta, \gamma)$ tale che:

$$p(a, \beta, \gamma) = p_1(a, \beta, \gamma) p_2(a, \beta, \gamma), \quad (\text{VI-21})$$

essendo le caratteristiche $p_2(a, \beta, \gamma)$ fra loro identiche disposte parallelamente.

Non si ha peraltro alcun modo di ricavare indicazioni precise quando i trasmettitori (od i ricevitori) del sistema non hanno le singole caratteristiche disposte parallelamente, quale è appunto il caso che si presenta allorchè si tratta di elementi ricetrasmettitori, disposti a paro dello scafo di un natante.

§ 6) - Proprietà direttive di elementi di grande superficie.

Finora è stata posta la condizione che la sorgente sonora fosse puntiforme, oppure che il ricevitore sonoro avesse uguale sensibilità per il suono proveniente da qualsiasi direzione.

Quando la superficie dell'emettitore, o del ricevitore, ha dimensioni non piccole di fronte alla lunghezza d'onda del suono, a meno che non si tratti di una sfera pulsante, la condizione suddetta non è più verificata. Infatti, nel caso di superficie emittente di dimensioni finite, i suoi elementi si muovono rigidamente ed in fase; e danno, per una direzione generica, una pressione sonora risultante che è la somma vettoriale delle pressioni sonore componenti sfasate fra di loro provocate dal moto dei singoli elementi della superficie. Questa pressione risultante, funzione della direzione, è generalmente minore della somma aritmetica di

tali componenti.

Nel caso di superficie ricevente, investita da un fronte d'onda sonoro, inclinato rispetto ad essa, i suoi diversi elementi vengono eccitati con differenza di fase, e poiché si devono muovere rigidamente tutti insieme, il movimento complessivo è provocato da una forza somma vettoriale delle oscillazioni componenti; di conseguenza, la grandezza, generata dal ricevitore, funzione della direzione di provenienza del suono, è generalmente minore di quella che si avrebbe se tutti gli elementi della superficie fossero sollecitati in fase.

Si consideri, ad esempio, un emettitore costituito da una superficie circolare di diametro D che vibri rigidamente spostandosi parallelamente a se stessa a guisa di pistone.

La direzione verso il punto A , posto ad una distanza dai punti del cerchio molto grande rispetto a D , formi l'angolo α con la normale al piano del cerchio. Ogni elemento infinitesimo dS della superficie del cerchio, essendo piccolo di fronte alla lunghezza d'onda, dà, preso singolarmente, gli stessi effetti adirezionali di una sferetta pulsante, e secondo la direzione considerata, si sommano vettorialmente tutte le pressioni componenti.

L'elemento dS (fig.62) limitato dalle circonferenze di raggi r ed $r + dr$ e dai raggi formanti gli angoli β e $\beta + d\beta$ con un raggio fisso OR preso da riferimento, ha una superficie:

$$dS = r d\beta \cdot dr .$$

Se si pone che la pressione totale generata sia uguale all'unità, la pressione dp_a generata dal movimento di dS è:

$$dp_a = \frac{1}{\frac{\pi D^2}{4}} \cdot dS = \frac{r d\beta \cdot dr}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

La distanza di dS dal fronte d'onda passante per il centro O del cerchio, risulta immediatamente dalla figura:

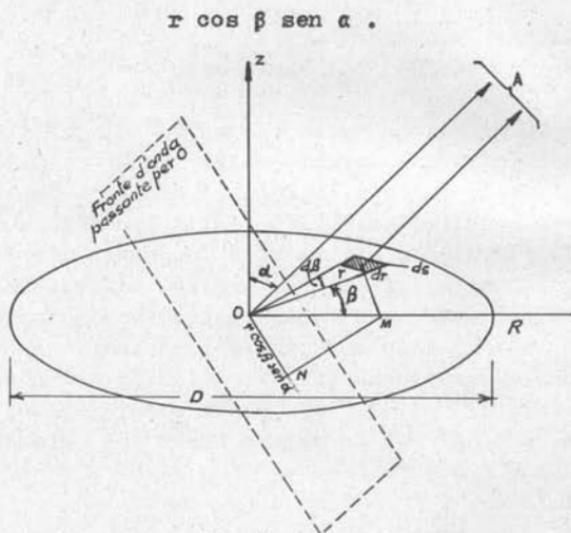


fig.62

Essendo $OM = r \cos \beta$, ed $ON = OM \operatorname{sen} \alpha$, la differenza di fase ϕ della pressione generata dall'elemento dS rispetto a quella generata dall'elemento centrale del cerchio nell'intorno di O , è:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} r \cos \beta \operatorname{sen} \alpha = \frac{\omega}{c} r \cos \beta \operatorname{sen} \alpha ;$$

quindi la componente della pressione generata $dp = dS \frac{\pi D^2}{4}$ da dS , riportata in fase con la pressione generata dall'elemento centrale del disco è:

$$dp \cos \theta = \frac{4 \cos \theta}{\pi D^2} dS ;$$

la somma vettoriale delle pressioni generate da tutti gli elementi si ottiene estendendo l'integrale a tutta la superficie del cerchio:

$$p_a = \int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} \frac{4r}{\pi D^2} \cos \left(\frac{\omega}{c} r \cos \beta \operatorname{sen} \alpha \right) dr d\beta =$$
$$= \frac{4}{\pi D^2} \int_0^{D/2} r dr \int_0^{2\pi} \cos \left(\frac{\omega}{c} r \cos \beta \operatorname{sen} \alpha \right) d\beta .$$

La determinazione di questo integrale doppio dà luogo alla seguente espressione:

$$p_a = \frac{2 J_1 \left(\frac{\omega D}{2c} \operatorname{sen} \alpha \right)}{\frac{\omega D}{2c} \operatorname{sen} \alpha} \quad (\text{VI-22})$$

dove J_1 è la funzione di Bessel di prima specie e di ordine uno della variabile $\frac{\omega D}{2c} \text{sen } \alpha$. Tenendo presente che nella pressione hanno pratica importanza solo i valori assoluti, si ha la caratteristica della pressione sonora p_α indicata in fig.63.

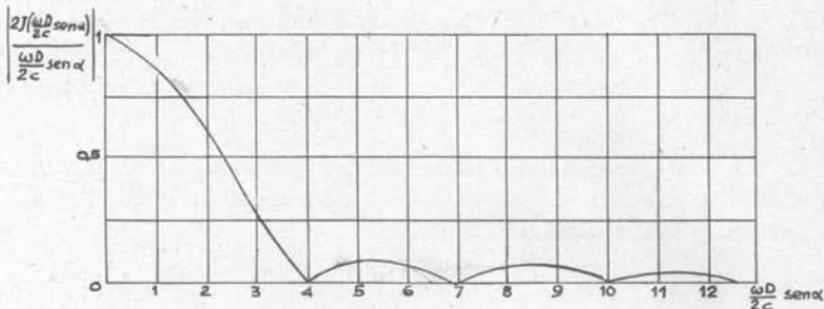


fig.63

Dalla figura si vede che p_α ha un lobo principale con il massimo uguale all'unità per $\alpha = 0$, cioè normalmente al cerchio; la pressione sonora diminuisce per direzioni con inclinazione crescente rispetto a questa normale. Si annulla una prima volta secondo le generatrici di un cono di apertura α tale che:

$$\frac{\omega D}{2c} \text{sen } \alpha = 3,8 \quad (\text{VI-23})$$

Aumentando ancora q , si hanno massimi secondari che però non superano il 12% di quello principale.

Se si impone che la caratteristica naturale non abbia massimi secondari, deve essere:

$$\frac{\omega D}{2\alpha} \leq 3,8 \quad , \quad D \leq 1,21 \lambda .$$

Quando il lobo principale della caratteristica naturale è tutto compreso in un angolo α di pochi gradi, si può, dalla (VI-23), dedurre una espressione approssimativa che definisce l'angolo solido Ω entro il quale è compreso tutto il lobo principale. Dalla fig. 64 si deduce subito nel caso che sia BC assai più piccolo di AB :

$$\Omega = \frac{\pi \left(\frac{AB^2}{1^2} + \frac{BC^2}{1^2} \right)}{1^2} \approx \pi \operatorname{sen}^2 \alpha . \quad (\text{VI-25})$$

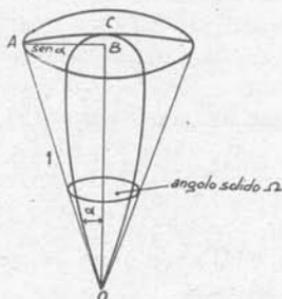


fig. 64

Combinando questa con la (VI-25) si ottiene:

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{3,8}{\pi} \frac{\lambda}{D} ,$$

$$\Omega = \frac{3,8^2}{\pi} \left(\frac{\lambda}{D} \right)^2 = 4,6 \left(\frac{\lambda}{D} \right)^2 , \quad (\text{VI-26})$$

in cui Ω un angolo solido misurato in radianti. Se si vuole espresso in gradi si moltiplica per 2π , e se si vuole la sua apertura α in gradi si applica la (VI-25).

§ 7) - Considerazioni generali sui sistemi direttivi.-

Riassumendo quanto è stato indicato nei precedenti paragrafi si può affermare che un emettitore sonoro od un ricevitore sonoro di estensione piccola rispetto alla lunghezza d'onda λ non hanno proprietà direttive.

Il quesito di emettere o ricevere direttivamente si può risolvere con un unico elemento quando esso sia grande rispetto a λ oppure quando, (pur essendo piccolo rispetto a λ), sia però incorporato in trombe o schermi di grandi dimensioni rispetto a λ .

Nel caso di ultrasuoni, dove le lunghezze d'onda sono generalmente assai piccole, è semplice attuare un sistema direttivo con un solo elemento, ma nel caso di suoni, le condizioni necessarie per ottenere un sistema direttivo porterebbero a dimensioni di apparecchi o di schermi, o di trombe così grandi che oltre a difficoltà costruttive e di manovra avrebbero in pratica l'inconveniente di essere troppo influenzate da eventuale movimento relativo del mezzo rispetto agli apparati, disturbano così l'emissione o la ricezione direttiva.

Se questa circostanza si presenta, si impone, per le ragioni suddette, la necessità di attuare sistemi direttivi formati da elementi piccoli rispetto alla lunghezza d'onda λ , posti a distanza fra loro dello stesso ordine di grandezza di λ .

Vi è un'altra importante distinzione pratica da fare tra i sistemi continui ed i sistemi discontinui. I secondi hanno una caratteristica artificiale, mentre i primi non la possono avere. Infatti non si può, per evidenti ragioni costruttive, imporre sfasamenti infinitesimi alle vibrazioni (od alle "grandezze generate") di ciascuno degli infiniti elementi contigui di superficie. Ciò vuol dire, in altre

parole, che per ruotare la caratteristica direttiva di un sistema continuo si deve sempre ruotare il sistema stesso; mentre per ruotare la caratteristica direttiva di un sistema discontinuo si può seguire i due metodi: o ruotare il sistema degli elementi, o variare in modo opportuno i loro sfasamenti.

Con un sistema discontinuo le due operazioni citate nei due metodi non hanno effetti identici. Con la prima si ruota la caratteristica naturale mentre con la seconda si ruota la caratteristica artificiale. Può convenire l'una o l'altra operazione a seconda della disposizione degli elementi in relazione allo scopo che si vuol raggiungere.

Quando la direzione di compensazione forma l'angolo $\epsilon = |\alpha - \gamma|$ con la direzione di propagazione ed il numero degli elementi del sistema è sufficientemente elevato sviluppando in serie l'espressione della caratteristica artificiale, si ottiene l'espressione della caratteristica artificiale, che risulta simmetrica nella forma seguente:

$$p(\epsilon) = 1 - a \epsilon^2 + b \epsilon^4 \dots \quad (\text{VI-26})$$

Per ϵ assai piccolo cioè per direzione di compensazione poco discosta da quella di propagazione, si da poter trascurare nello sviluppo i termini contenenti le potenze di ϵ superiori alla seconda, la (VI-26) è:

$$p(\epsilon) \approx 1 - a \epsilon^2, \quad (\text{VI-27})$$

ed il coefficiente a da l'indicazione dell'acutezza del lobo della caratteristica artificiale cioè una quantità strettamente legata alla precisione della direttività del

la emissione o della ricezione (fig.65).

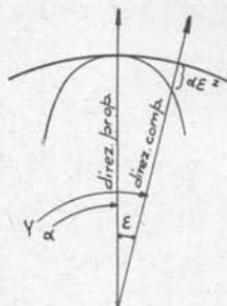


fig.65

Le caratteristiche naturali ed artificiale dipendono generalmente dalla frequenza. Solo il primo lobo principale (ottenuto per $\alpha = 90^\circ$ nel caso di caratteristica naturale, o per $\alpha = \gamma$ nel caso di caratteristica artificiale) non dipende dalla frequenza.

Quando nel fenomeno compaiono contemporaneamente frequenze diverse, solo questo lobo, pur variando di acutezza, resta orientato nella stessa direzione, e conserva invariato il suo valor massimo.

Tutti gli altri lobi variano con la frequenza in grandezza, direzione e fase; dando, per diverse frequenze presenti contemporaneamente, una risultante globale di valore assai piccolo. La caratteristica direttiva globale assume un andamento come quello indicato schematicamente in fig. 66.

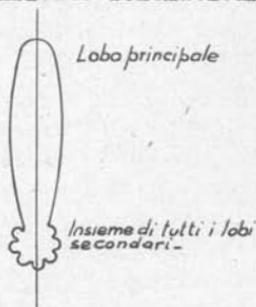


fig.66

In un sistema continuo, si osserva in pratica che non sempre si riesce ad ottenere la vibrazione rigida di tutti i suoi elementi. Per frequenze superiori ad un certo limite, funzione della rigidità del sistema, cominciano a prodursi vibrazioni in opposizione di fase delle diverse parti di esso, separate da linee nodali. La conformazione di queste linee nodali (figura di Chladni) varia con la frequenza, raffittendosi sempre di più all'aumentare della frequenza stessa.

La presenza di parti della superficie che vibrano in opposizione di fase (o di solito anche con diverse ampiezze) altera le considerazioni svolte quando si è assimilato la superficie ad un pistone rigido vibrante; e le conclusioni trovate a proposito del pistone circolare, valgono solo come grossolana approssimazione.

Purtroppo questo inconveniente non è in alcun modo eliminabile; si può contrastare irrigidendo le superfici, e leggermente curvandole, ma comunque si produce ancora a frequenza sonora a frequenza un po' più elevata.

Tutti i calcoli finora svolti si sono riferiti a sistemi piani in cui cioè gli elementi finiti od infinitesimi del sistema sono distribuiti sopra un piano. Anche i sistemi spaziali hanno caratteristiche direttive che possono essere determinate e studiate in modo analogo, per quanto più complesso, a quanto è stato fatto per i sistemi piani. Le applicazioni pratiche di tali studi sembrano tutt'oggi peraltro assai limitate.

oooooooo
ooooo
ooo
o

Capitolo VII

TRASFORMAZIONI ELETTROACUSTICHE

—oOo—

1) - Quadripoli elettroacustici.-

La trasformazione di energia acustica in altra energia acustica può avvenire attraverso trasformazioni intermedie, quali la trasformazione di energia acustica in meccanica e viceversa, oppure la trasformazione di energia acustica in meccanica, di questa in elettrica, poi di quest'ultima nuovamente in meccanica ed infine in acustica. Se i fenomeni sono a regime si può parlare di potenze medie invece che di energie.

Sia nel primo che nel secondo schema di trasformazione i due fattori della potenza acustica di partenza: pressione p_1 e velocità ξ_1 possono essere messi in relazione con i fattori della potenza acustica finale, o di uscita: pressione p_2 e velocità ξ_2 , in modo da ricavare la legge che regola la trasformazione di energia.

Si potrà in questo caso parlare di quadripoli acustici, così come si considerano e definiscono i quadripoli elettrici. Il sistema di equazioni che definisce il quadripolo lineare e passivo, cioè privo di generatori interni di potenza, può mettersi sotto la forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_2' = a_{11} \xi_1' + a_{12} p_1 \\ p_2 = a_{21} \xi_1' + a_{22} p_1 \end{array} \right. \quad (\text{VII-1})$$

Reciprocamente le grandezze relative alla potenza acustica di entrata sono espresse in funzione delle grandezze relative alla potenza acustica di uscita:

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_1' = \frac{a_{22}}{\Delta} \xi_2' - \frac{a_{12}}{\Delta} p_2 \\ p_1 = -\frac{a_{21}}{\Delta} \xi_2' + \frac{a_{11}}{\Delta} p_2 \end{array} \right. \quad (\text{VII-2})$$

Le a_{11} ed a_{22} sono numeri, a_{21} è omogenea con una resistenza acustica, o più genericamente, con una impedenza, a_{12} è omogenea con l'inverso di una impedenza acustica, e Δ è il determinante dei coefficienti del sistema (VII-1).

$$\Delta = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21} ,$$

anch'esso numero puro.

Il legame espresso dall'uno o dall'altro dei due sistemi, tra le grandezze a monte ed a valle del quadripolo è di natura generale; hanno importanza pratica quei tipi lineari

di quadripoli, nei quali le α sono indipendenti da ξ' e da p . Dei quattro parametri solo tre sono indipendenti, perchè essi sono legati dalla relazione per la quale il determinante del sistema $\Delta = 1$.

Si definisce quadripolo quello simmetrico per il quale sia $\alpha_{11} = \alpha_{22}$. In tal caso due parametri sono sufficienti a fissarne le proprietà.

Occorre tenere sempre ben presente che le equazioni scritte nel caso di linearità del quadripolo non sono applicabili quando si operi in un campo delle variabili ξ' e p , in cui tale linearità non è più rispettata.

Un caso particolare si ha quando un quadripolo lineare è anche reversibile, cioè possono essere scambiate di posto ξ'_1 con ξ'_2 , e p_1 con p_2 , valendo ancora le relazioni sovrascritte.

Invece di una trasformazione di energia acustica, in altra acustica, si può considerare una trasformazione di energia acustica in meccanica, e viceversa; o di energia acustica in elettrica e viceversa. Queste possono essere in effetti trasformazioni intermedie di una trasformazione totale di energia acustica in altra pure acustica.

I fattori della potenza nel caso di energia meccanica sono la forza F e la velocità v (non si adopera qui il simbolo ξ' per la velocità dell'organo meccanico per non creare confusione con la velocità ξ' delle particelle del mezzo sede di onda sonora), nel caso di energia elettrica tali fattori sono la tensione V e la corrente I nella impedenza elettrica, di uscita.

Ad esempio, nel caso di trasformazione acustico-elettrica:

$$\begin{cases} I = Y_{11} \xi' + Y_{12} p, \\ V = Y_{21} \xi' + Y_{22} p, \end{cases}$$

ed analogamente alla (VII-2):

$$\xi' = \frac{Y_{22}}{\Delta''} I - \frac{Y_{12}}{\Delta''} V ,$$

$$p = - \frac{Y_{21}}{\Delta''} I + \frac{Y_{11}}{\Delta''} V ,$$

ove:

$$\Delta'' = Y_{11} Y_{22} - Y_{12} Y_{21} .$$

§2) - Principi fisici che regolano le trasformazioni elettroacustiche.

Per la trasformazione di energia elettrica in meccanica ed acustica, o viceversa, a scopi applicativi vengono sfruttati diversi principi fisici; in particolare i principi fondamentali, elettrostatico, magnetostatico, elettrodinamico, piezoelettrico e magnetostrittivo. Lo stesso apparato, avendo funzionamento reversibile, può essere usato come traslatore o trasduttore, di energia elettrica in meccanica ed acustica, o viceversa. Nel primo caso si impiega come trasmettitore, nel secondo come ricevitore.

La trasformazione di energia elettrica in meccanica e quindi in acustica, nel caso di eccitazione elettrostatica o magnetostatica può aversi o con un trasmettitore polarizzato, nel quale cioè può essere prodotto un preesistente stato di eccitazione permanente, che è detto polarizzazione e che serve da tramite per il determinato processo di trasformazione di energia; oppure con un trasmettitore non polarizzato.

La teoria generale sui trasduttori elettroacustici, sia trasmettitori sia ricevitori, si fonda sulla impostazione e sulla soluzione di due equazioni differenziali contenenti termini di carattere meccanico ed elettrico.

Nel caso del trasmettitore, la impostazione della prima equazione consegue dalla classica forma della rela-

zione meccanica dell'equilibrio delle forze. La somma di tutte le forze reagenti sul sistema meccanico deve uguagliare in ogni istante la forza applicata, la quale trae origine da uno dei cinque fenomeni sovramenzionati. L'equazione ha la forma:

$$f = m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + a \frac{d\xi}{dt} + h\xi \quad (\text{VII-3})$$

dove f è una funzione periodica del tempo. Il caso di forze applicate non periodiche, e non scomponibili in somme di forze periodiche, ha solo limitato interesse.

Una forza che agisce tra due punti provoca uno spostamento ξ , inteso come quello di una massa puntiforme m_1 rispetto ad un'altra massa puntiforme m_2 . Anche una elasticità od una resistenza frenante agiscono sempre fra due masse. Di conseguenza il simbolo m nell'equazione (VII-3) deve essere inteso come simbolo per una doppia massa che si compone di due masse parziali m_1 ed m_2 ; cioè:

$$m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

Si possono presentare i due casi particolari, in cui una massa, ad esempio la m_2 , è molto grande rispetto ad m_1 , ed allora risulta $m \simeq m_1$; e quello in cui le due masse sono eguali ed allora è $m = \frac{m_1}{2}$.

La forza f applicata dipende da un parametro elettrico, e precisamente nei seguenti casi di trasmettitori:

- elettrostatico non polarizzato: dipende dal quadrato della tensione;

- elettrostatico polarizzato: dipende dalla tensione;
- magnetostatico non polarizzato: dipende dal quadrato della corrente;
- magnetostatico polarizzato: dipende dalla corrente;
- elettrodinamico: dipende dalla corrente;
- piezoelettrico : dipende dalla tensione;
- magnetostriativo polarizzato : dipende circa dalla corrente.

Le relazioni tra la forza applicata e il sistema di ec citazione elettrica sono ben note dalla elettrotecnica generale.

Il termine della (VII-3) relativo alla forza resisten te, o frenante, a ξ è l'unico che produca un effettivo con sumo di potenza, e, come è stato già esposto al Cap. III, è scomponibile in due termini di cui l'uno tiene conto dell'at trito interno ed esterno del movimento meccanico, e l'altro della resistenza acustica. Si è visto che in generale il ren dimento e la fedeltà di una trasformazione di potenza mecca nica in acustica sono requisiti tra loro contrastanti; e lo scopo a cui tende lo studio dell'elettroacustica è di otte nere appunto la migliore fedeltà compatibile col più eleva to rendimento.

La impostazione della seconda equazione differenziale nel caso del trasmettitore è generalmente fatta partendo dal principio di conservazione dell'energia. Esso può essere for mulato come segue: il lavoro fornito nel tempo dt dall'org ano eccitatore elettrico di funzione v e che eroga corren te i in un tempo elementare dt , cioè $v i dt$, deve e guagliare la somma di tutte le energie consumate od immagaz zinate nel trasmettitore nello stesso intervallo di tempo dt .

Se si indicano con \mathcal{E} ed \mathcal{M} i valori istantanei delle energie immagazzinate sotto le forme elettriche e meccaniche nel trasmettitore, e con P_e e P_m i valori istantanei del le potenza elettrica e meccanica consumata nel trasmettitore, tutta l'energia consumata od immagazzinata nel tempo dt è:

$$P_e dt + P_m dt + d\mathcal{E} + d\mathcal{M} ,$$

e per il principio della conservazione dell'energia:

$$v_i = P_e + P_m + \frac{d\mathcal{E}}{dt} + \frac{d\mathcal{M}}{dt} . \quad (\text{VII-4})$$

Questa relazione di carattere del tutto generale, può, a seconda dei casi, prendere aspetti diversi, e si potrebbe mostrare che essa definisce le condizioni di migliore a dattamento del carico offerto dal trasmettitore elettro-acustico sul generatore di energia elettrica che lo eccita.

Nel caso del ricevitore elettroacustico è da osservar si che in quella parte dell'apparecchio che serve da organo motore, quando l'apparecchio stesso funziona da trasmettitore, sorge in conseguenza delle oscillazioni meccaniche, una corrente od una tensione che produce a sua volta una forza dello stesso tipo di quella eccitatrice nel caso del trasmettitore. Questa forza ha, a parità di spostamento ξ , lo stesso valore f come nell'equazione differenziale (VII-3), come questa, si ricava dalle dimensioni elettro-magnetiche e geometriche dell'apparecchio; soltanto è di segno contrario poichè invece di essere una forza eccitatrice, è divenuta una forza generata.

Se, ad esempio, il ricevitore è eccitato da una forza meccanica sinusoidale

$$D = D_0 \text{ sen } \omega t$$

la prima equazione diviene:

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + a \frac{d \xi}{dt} + h \xi + f = D. \quad (\text{VII-5})$$

Quando si tratti di un ricevitore elettroacustico posto in un campo sonoro, l'ampiezza D_0 della forza eccitatrice, è data dal prodotto $S p_0$ dell'ampiezza della pressione sonora p_0 per la superficie ricevente S .

La impostazione della seconda equazione differenziale, si ottiene in modo del tutto analogo alla (VII-7), soltanto in luogo dell'energia elettrica fornita, vi è l'energia meccanica fornita $D \xi' dt$ nell'intervallo elementare di tempo dt . Si ottiene quindi:

$$D \xi' = P_e + P_m + \frac{d\mathcal{E}}{dt} + \frac{d\mathcal{M}}{dt}, \quad (\text{VII-6})$$

in cui P_e , P_m , \mathcal{E} ed \mathcal{M} hanno lo stesso significato fisico come nella (nella VII-4). Anche questa equazione di carattere generale è suscettibile di essere semplificata, di assumere forme diverse a seconda del caso particolare di ricevitore che si considera.

Lo studio dei trasmettitori e ricevitori elettroacustici può essere effettuato secondo una linea direttiva unica, la quale permette di ricavare risultati di utile applicazione. Purtroppo però, nei casi pratici, oltre ai fenomeni principali, facilmente analizzabili, intervengono anche una tale quantità di intricati fenomeni secondari (riguardo ad alcuni dei quali verrà fatto cenno in seguito), i quali non sono sottoponibili ad una teoria generale semplice, e mascherano in notevole misura i fenomeni principali stessi.

La costruzione di un traslatore elettroacustico può essere fatta applicando i risultati della trattazione teorica

generale, affidandosi però a dati ed accorgimenti ricavati direttamente dall'esperienza. Lo studio teorico preliminare serve a determinare le condizioni di massimo rendimento e di maggiore fedeltà che sono in generale, i requisiti richiesti ad ogni traslatore.

Nei prossimi capitoli verranno brevemente trattati i più importanti traslatori elettroacustici, cioè i microfoni, i telefoni e gli altoparlanti, seguendo vie che possono sembrare diverse da quella ora accennata, ma che in realtà si potrebbero ricondurre facilmente a questa.

oooooooo
oooooo
oooo
oo
o

Capitolo VIII

M I C R O F O N I

---oOo---

§ 1) - Risposta dei microfoni.-

Il microfono è un ricevitore elettroacustico atto a funzionare generalmente in una vasta gamma di frequenza. Le potenze in giuoco sono di solito molto al di sotto dei mil livatt.

Mediante i microfoni si tende ad avere in forma elettrica una rappresentazione del campo sonoro, sia per effettuare misure e ricerche su di esso, sia per trasmettere, a distanza, notizia dei fenomeni che vi si compiono. E' evidente come si richieda, in via assoluta, che la grandezza elettrica sia immagine quanto più è possibile fedele della situazione acustica del punto del campo sonoro, nel quale si trova il microfono.

Si vogliono ora classificare i diversi tipi di microfoni, in relazione al modo con cui viene effettuata questa trasformazione di energia.

E' necessario distinguere:

- a) - microfoni, i quali compiono la trasformazione diretta dell'energia sonora in energia elettrica (i quali sono però estremamente poco diffusi), come il mi

crofono a file caldo (termofono);

- b) - i microfoni i quali compiono la trasformazione di energia sonora in energia elettrica mediante una trasformazione acustico-magnetico-elettrica.

Ci si limita a considerare ora i microfoni del secondo gruppo, che costituiscono la quasi totalità dei microfoni esistenti, nei quali la conversazione di energia sonora in elettrica avviene mediante una trasformazione elettromeccanica. Si vede che tutti possono ridursi ad uno schema di principio molto semplice. Un organo meccanico (membrana tesa, piastra, sottile nastro od altro) sotto l'azione di una forza prodotta dal campo sonoro si deforma e si sposta rispetto alla posizione di riposo; lo spostamento viene utilizzato per far variare la caratteristica di un circuito elettrico.

Se si osserva la trasformazione nel suo complesso, si vede dal punto di vista energetico un possibile modo di raggruppamento dei microfoni: microfoni trasformatori di energia, nei quali la potenza elettrica generata dipende direttamente dalla potenza fornita dal campo sonoro, e microfoni a relè, nei quali invece lo spostamento dell'organo mobile, prodotto dall'azione delle onde sonore, viene utilizzato semplicemente come elemento che governa le caratteristiche di un opportuno circuito elettrico. E' questo il caso tipico del microfono a polverino di carbone, nel quale gli spostamenti della membrana originano variazioni della resistenza dello strato di granuli di carbone, e di conseguenza variazioni di corrente. A tali variazioni fa riscontro un contenuto energetico, che non ha più nulla a che vedere con quello dell'azione svolta dal campo sonoro.

Siffatti microfoni a relè sono irreversibili, in quanto, fornendo ad essi della energia elettrica, non ridanno in alcun modo energia acustica, mentre i microfoni trasformatori funzionano sempre secondo un principio reversibile.

Dei microfoni a relè è generalmente irreversibile la trasformazione di energia meccanica in elettrica.

Limitiamoci a considerare, dal punto di vista teorico, i ricevitori nei quali le trasformazioni di energia avvengono

gono in modo più completo.

I momenti della trasformazione possono fissarsi così:

- La pressione sonora p e la velocità ξ' del campo sonoro sono le grandezze di ingresso del quadripolo, e generalmente, essendo noto in quale mezzo avviene la propagazione dell'onda sonora, esse non sono indipendenti, ma risultano legate l'una all'altra dalla caratteristica della propagazione sonora.

Poichè il microfono è in generale di materiale solido e quindi di resistenza di radiazione molto maggiore di quella del mezzo, e le sue dimensioni possono non essere trascurabili di fronte alla lunghezza d'onda, la pressione sonora agente su di esso, può differire da quella del campo sonoro per effetto di diffrazione, fino a raggiungere il doppio di quella del campo sonoro stesso, per rapporti tra le dimensioni geometriche del microfono e λ superiori ad un certo limite (fig.67), cioè allorchè si ha una riflessione totale dell'onda sonora sul microfono. Il campo sonoro, per effetto di:

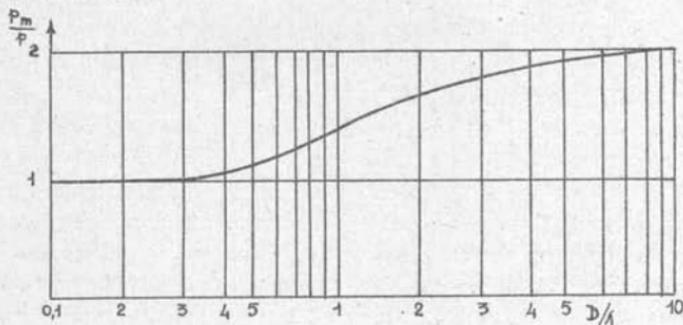


fig.67

p_m = pressione sul microfono ,

p = " del campo sonoro

D = dimensioni medie del microfono normali alla propagazione.

una trasformazione acusto-meccanica, genera una forza F che risulta applicata all'organo mobile ed una velocità v dell'organo mobile, legate tra loro dalla caratteristica meccanica dell'organo mobile stesso, Questo fenomeno meccanico, per effetto di una trasformazione meccanico-elettrica produce una d.d.p. V agli estremi di un circuito elettrico opportunamente predisposto, in cui circola una corrente in funzione della caratteristica elettrica del circuito stesso.

Nota il legame fra p ed ξ' , generalmente lineare, relativo alla caratteristica della propagazione del mezzo considerato, ed il legame pur esso ad esempio lineare tra V ed I , dato dalla caratteristica del circuito elettrico, tra le sei grandezze p , ξ' , F , v , V ed I sono conosciute a priori due relazioni, e se si stabiliscono altre tre relazioni di dipendenza, definite dalla trasformazione acusto-meccanica, dalla caratteristica meccanica e dalla trasformazione meccanico-elettrica, si hanno 5 relazioni, tra 6 grandezze, cioè si può ricavare un legame biunivoco tra una grandezza acustica, ad esempio la pressione p ed una grandezza elettrica, ad esempio la tensione V ; quindi il comportamento del microfono risulta completamente definito.

Si devono ora considerare i rimanenti tre punti della trasformazione, cioè: trasformazione acustico-meccanica, caratteristica meccanica e trasformazione meccanico-elettrica.

Riferendosi alla trasformazione acustico-meccanica i microfoni si dividono in microfoni a pressione ed in microfoni a gradiente di pressione, a seconda cioè che la forza F risulti funzione della pressione acustica o del gradiente della pressione acustica (differenza di pressione tra un punto a monte ed uno a valle dell'organo mobile).

Nel primo caso l'ampiezza F della forza è proporzionale all'ampiezza della pressione di andamento sinusoidale nel tempo. Nel secondo caso la forza, essendo proporzionale alla derivata di p ha ampiezza proporzionale ad ωp_0 .

Riferendosi alla caratteristica meccanica si considerano separatamente i due casi, in cui cioè la frequenza di risonanza dell'organo meccanico $\omega/2\pi$ sia notevolmente inferiore o notevolmente superiore alla frequenza $\omega/2\pi$ del campo sonoro.

è un circuito risonante dove

Nel primo caso il termine ωm nell'espressione della impedenza meccanica è preponderante rispetto agli altri e quindi la velocità dell'organo mobile v è praticamente proporzionale ad F/ω , mentre nel secondo caso il termine h/ω dell'impedenza è preponderante sugli altri e quindi la velocità dell'organo mobile v è praticamente proporzionale ad ωF .

Riferendosi alla trasformazione meccanico-elettrica, si dividono i microfoni in microfoni di velocità e microfoni di spostamento. Infatti la f.e.m. generata e può essere proporzionale alla velocità v dell'organo mobile o del suo integrale, cioè dello spostamento v/ω .

Si ricordano due casi tipici: se la f.e.m. è dovuta allo spostamento di un conduttore in un campo magnetico (principio elettrodinamico) essa dipende dalla velocità con quale avvengono gli spostamenti; se invece la f.e.m. è dovuta a variazioni di capacità (principio elettrostatico) essa dipende dallo spostamento.

La corrente I in una impedenza di chiusa del microfono è poi proporzionale ad ωe , e, e/ω a seconda che l'impedenza totale del circuito elettrico cioè impedenza di chiusa sommata con l'impedenza interna del microfono è prevalentemente capacitiva, resistiva ed induttiva. Si indica con V la d.d.p. agli estremi dell'impedenza di uscita del microfono.

Si riassumono, qui di seguito, le diverse fasi della trasformazione totale, tenendo presente che si tratta di una classificazione di massima.

Affinchè il microfono sia fedele, cioè produca una grandezza elettrica proporzionale ad una grandezza acustica con un coefficiente di proporzionalità costante ed indipendente dalla frequenza, occorre, che le diverse trasformazioni e caratteristiche indicate nella tabella precedente siano scelte opportunamente.

Ad esempio: un microfono a pressione, con frequenza di risonanza maggiore di quelle della gamma acustica da riprodurre, cioè $\omega_0 \gg \omega$, di spostamento, e con circuito elettrico resistivo, si trova appunto nella condizione:

$$V \equiv p$$

Caratteristica di propagazione sonora. (I)	Trasformazione acustico-meccanica. (II)	Caratteristica meccanica. (III)	Trasformazione meccanica - elettrica. (IV)	Caratteristica elettrica. (V)
$P = (r + jx) \zeta'_{\max}$ (in questa relazione è compresa anche l'eventuale effetto di diffrazione)	microfono a pressione $F \equiv P$	$\omega \gg \omega_0$ $v \equiv \frac{1}{\omega} F$	microfono di velocità $e \equiv v$	circuito capacitivo $I \equiv \omega e$
	microfono a gradiente di pressione $F \equiv \omega P$	$\omega \ll \omega_0$ $v \equiv \omega F$	microfono di spostamento $e \equiv \frac{v}{\omega}$	$I \equiv e$ circuito resistivo
	$I \equiv \frac{e}{\omega}$ circuito induttivo			

Oppure: un microfono a pressione, con frequenza di risonanza minore di quelle da riprodurre, cioè $\omega_0 \ll \omega$, di velocità e con circuito elettrico resistivo, si trova pur esso in condizioni di buona fedeltà di riproduzione.

Questa schematizzazione del microfono vale soltanto, come si è visto, quando si consideri una massa, una elasticità ed una resistenza concentrate, in modo che risulti una scla frequenza di risonanza.

In pratica invece, oltre la risonanza principale dell'organo mobile del microfono, vi sono anche molte risonanze secondarie, di carattere acustico o meccanico, che alterano notevolmente il comportamento semplice ora esaminato. Pertanto, pur restando vevoli tutte le considerazioni precedenti nei riguardi della risonanza principale, è difficile prevedere a priori completamente il comportamento di un microfono; solo l'esperienza può rilevare tutte le particolarità della sua risposta.

Per valutare compiutamente un microfono occorre conoscere anzitutto: la caratteristica di frequenza (diagramma della d.d.p. ai suoi morsetti chiusi su una determinata impedenza in funzione della frequenza, nel caso in cui la pressione acustica rimanga costante al variare della frequenza); la sensibilità (rapporto fra la potenza uscente e la potenza entrante, od altro rapporto equivalente, che consenta di apprezzare il rendimento della trasformazione microfonica); la distorsione non lineare (comparsa di armoniche nel caso di suono impresso originariamente puro); il diagramma di direzionalità cioè la sensibilità a seconda dell'angolo di incidenza dell'onda sonora.

In secondo luogo occorre conoscere le caratteristiche legate alla pratica attuazione del microfono, quali: l'entità del rumore di fondo, l'inalterabilità delle caratteristiche al variare dei parametri atmosferici e nel tempo, la robustezza, la maneggevolezza e via dicendo.

Tralasciando questo secondo gruppo di caratteristiche, si porta ora tutta l'attenzione su quelle che sono le qualità tipiche delle varie classi di microfono, indipendentemente dalla loro attuazione pratica.

Caratteristica di frequenza e sensibilità sono in pratica globalmente compresa sotto il nome di "efficienza della trasformazione microfonica", essendo un microfono è tan to più efficiente per l'uso quanto più è ampia la gamma tra smessa e quanto maggiore il rendimento elettro-acustico.

Una sensibilità eguale in tutte le direzioni, non è invece qualità essenziale; un microfono avente una sensibilità maggiore entro un certo angolo solido sia per molte applicazioni può essere più adatto di uno a sensibilità costante. Per contro, per le applicazioni normali, è certamente poco buone un microfono capace di trasmettere una sola porzione della gamma delle frequenze acustiche.

Se il microfono è connesso, come si è detto accadere quasi sempre, ad un amplificatore a tubi, la potenza elettrica fornita dal microfono può essere ritenuta uguale a $\frac{V^2}{2R}$ essendo U il valore massimo della d.d.p. applicata alla resistenza di ingresso R del primo tubo, ammessa tra scurabile la componente reattiva della impedenza di entra ta del tubo stesso.

La valutazione della efficienza di un microfono viene così ricondotta alla determinazione del quoziente $\frac{V}{p}$, dove V è la d.d.p. applicata alla griglia del primo tubo e p è pressione del campo sonoro che si ha nel punto occupato dal microfono, quando esso non vi si trova.

Le ordinate della curva di risposta, espresse in $V \text{ m}^2 / \text{Nw}$ nel sistema M.K.S., o, con sistema empirico in V / baria , danno la sensibilità del microfono per le diver se frequenze.

La direttività di un microfono è dovuta al fatto che l'organò mobile occupa una posizione dissimetrica rispetto al centro del microfono. Tale fenomeno comincia a farsi sen tire solo quando le lunghezze d'onda del suono da riprodur re divengono paragonabili ed inferiori alle dimensioni geo metriche del microfono stesso.

La distorsione non lineare si può avere in qualsiasi tipo di microfono quando la pressione sonora p supera cer ti limiti. Per i microfoni nei quali occorre una polarizza zione elettrica, cioè nei ricevitori magnetostatici ed e-

lettrostatici, la distorsione non lineare si ha anche per pressioni sonore molto piccole, perchè è insita nel principio stesso di funzionamento dell'apparecchio.

§ 3) - Microfono a polverino di carbone.

Si esaminino ora i tipi più diffusi di microfono, cominciando dal diffusissimo microfono a polverino di carbone.

Il polverino di carbone ben secco è costituito da pietruzze di forma irregolare di dimensioni fra di loro non molto diverse, e mutuo e disordinato contatto su piccole porzioni della loro superficie.

Se viene esercitata una pressione meccanica su di una massa di materiale semiconduttore così costituito, per effetto della deformabilità dei singoli granellini, le superficie di contatto aumentano, ritornando ad essere quelle iniziali quando la pressione cessa di agire. L'inverso succede quando si applichi una leggera depressione.

La resistenza elettrica del polverino di carbone perciò varia al variare della pressione, perchè, anche a prescindere da altri fenomeni concomitanti, variano le superficie di contatto tra i singoli granellini.

La resistenza elettrica del polverino in quiete e non sottoposto ad alcuna sollecitazione, supposta misurata in assenza di corrente, ha valore ben determinato.

Se la massa di polverino di carbone è invece percorsa da corrente elettrica o se è sottoposta a scuotimenti, la resistenza varia spontaneamente intorno ad un valore medio in maniera del tutto irregolare, perchè sotto le azioni elettrostatica e termica della corrente, o sotto l'azione degli scuotimenti, variano le superficie di contatto dei granellini.

Il microfono a polverino di carbone, inserito in installazioni elettroacustiche è la causa di un notevole rumore di fondo, provocato dalla suddetta variazione spontanea di resistenza.

Un microfono a polverino di carbone a semplice effetto è generalmente costituito da una capsula cilindrica di diametro $f \approx 0,5 \text{ cm}^3$ di volume, assai schiacciata, di cui le pareti frontali sono di materiale conduttore (spesso carbone duro), costituenti gli elettrodi del microfono, e la superficie laterale è di materiale soffice ed isolante, generalmente cotone. Ad uno degli elettrodi viene collegata una membrana per aumentare la sensibilità del microfono. Talvolta esistono increspature nell'interno della capsula le quali sorreggono il polverino e gli impediscono di andarsi ad ammassare tutto in basso quando la capsula è disposta con l'asse orizzontale.

Un microfono a doppio effetto, o differenziale, è costituito da una capsula del tutto analoga a quella relativa ad un microfono a semplice effetto, solamente contiene in più una parete divisoria centrale di materiale conduttore. Il terzo elettrodo formato da questa parete è collegato a mezzo di una sbarretta rigida ad una membrana posta all'esterno della capsula microfonica per aumentarne la sensibilità.

Un fenomeno abbastanza frequente nei microfoni a carbone è l'intasamento del polverino. Ciò avviene quando, per l'umidità penetrata nella capsula o per lunga immobilità del microfono, i granellini si sono "appiccicati" insieme in modo tanto stretto, che la loro disposizione non è più apprezzabilmente perturbata dalla pressione sonora.

Quando questo fenomeno si presenta, il microfono diminuisce nettamente di sensibilità, e può ritornare al normale funzionamento, o riscaldandolo gradatamente, o sottoponendolo a piccoli urti.

Schematicamente il microfono a semplice effetto M è inserito in un circuito come indicato in figura 67. Sia r la resistenza media del microfono in assenza di pressione alternativa, R_0 la resistenza del primario del trasformatore T e dell'insieme dei conduttori, ed E la f.e.m. applicata. La corrente I che circola è:

$$I = \frac{E}{R_0 + r}$$

Sottoposto il microfono M ad una pressione alternativa, ad esempio di forma sinusoidale $p = p_0 \text{ sen } \omega t$, ammettiamo che la resistenza del microfono varii leggermente ad r con la legge simile a quella della pressione esercitata sul microfono, sia cioè:

$$r = k p_0 \text{ sen } \omega t$$

la resistenza del microfono, in cui k è un coefficiente di dimensioni ohm/barie, proporzionale alla sensibilità del microfono, e sia $k P r$. Di conseguenza la corrente i che circola in queste condizioni è:

$$i = \frac{E}{R_0 + r - k p_0 \text{ sen } \omega t} = \frac{E}{R_0 + r} \frac{1}{1 - \frac{k p_0}{R_0 + r} \text{ sen } \omega t}$$

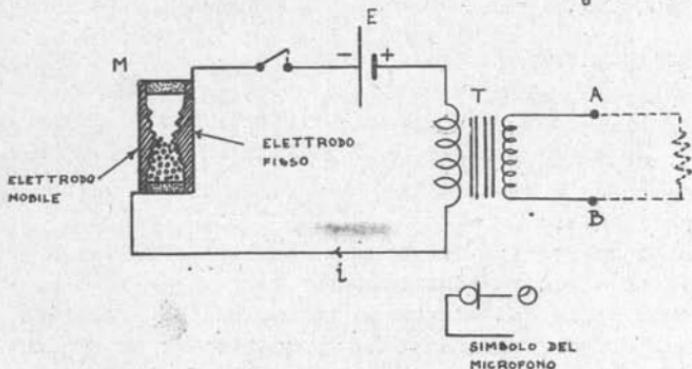


fig.67

Sviluppando in serie il secondo fattore, si ha:

Si può considerare un sistema passivo, dove una parte di tensione T, del primo effetto resistenziale. Dallo sviluppo in serie di questa T, del primo effetto resistenziale, si può vedere che il secondo fattore è simile a quello del primo.

$$i = \frac{E}{R_0 + r} \left(1 + \frac{k p_0}{R_0 + r} \operatorname{sen} \omega t + \frac{k^2 p_0^2}{(R_0 + r)^2} \operatorname{sen}^2 \omega t, \dots \right)$$

Poichè normalmente è $\frac{k p_0}{R_0 + r} \ll 1$, si possono trascurare i termini dello sviluppo, oltre il terzo. Si ottiene allora:

$$I = \frac{E}{R_0 + r} \left(1 + \frac{k^2 p_0^2}{2(R_0 + r)^2} \right) + \frac{E}{R_0 + r} \frac{k p_0}{R_0 + r} \operatorname{sen} \omega t - \frac{E}{R_0 + r} \frac{k^2 p_0^2}{2(R_0 + r)^2} \cos 2 \omega t.$$

A prescindere dal primo termine del secondo membro, che rappresenta una corrente continua, si vede che il secondo termine rappresenta una corrente di frequenza uguale a quella della pressione applicata al microfono, e di ampiezza:

$$\frac{E k p_0}{(R_0 + r)^2},$$

che circola nel primario del trasformatore. A parità di p_0 e delle costanti elettriche, questa corrente è tanto maggiore quanto maggiore è k .

Nella espressione della corrente compare anche una seconda armonica che provoca una distorsione non lineare.

La distorsione non lineare δ relativa alla sola seconda armonica, è:

$$\delta = \frac{\frac{Ek^2 p_o^2}{2(R_o + r)^3}}{\frac{Ek p_o}{(R_o + r)^2}} = \frac{k p_o}{2(R_o + r)}$$

ed a parità di costanti elettriche del circuito, è tanto maggiore quanto più grande è k.

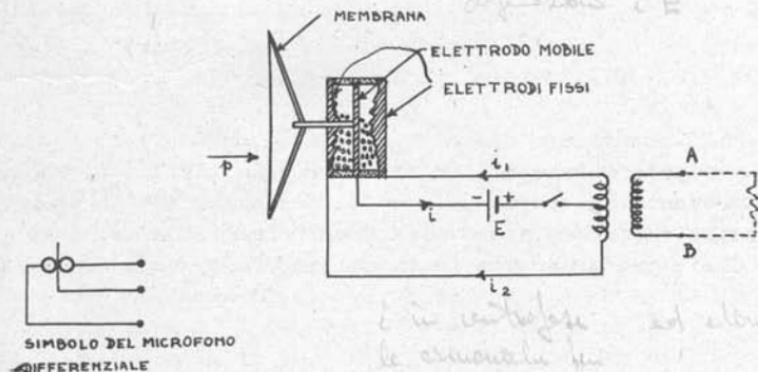


fig.68

Il coefficiente k determina la sensibilità del microfono e la distorsione. Al crescere della sensibilità del microfono, diminuisce la fedeltà e viceversa.

Nel microfono differenziale a polverino, posto come è indicato in figura 68, si può mostrare facilmente che, nell'ipotesi teorica di eguaglianza delle correnti i_1 ed i_2

nei due rami, mancano le distorsioni di armoniche di ordine pari; però esistono ancora distorsioni dovute alla presenza delle armoniche di ordine dispari.

Tuttavia nel caso dei microfoni a polverino di carbone la riduzione della distorsione non lineare che si ha con capsula differenziale è del tutto illusoria, perchè anche a prescindere dal fatto che è normalmente $i_1 \neq i_2$, le distorsioni provocate dalle variazioni spontanee della resistenza del polverino sono in gran lunga più notevoli di quelle insite nel sistema.

La curva di risposta di un microfono a polverino in conseguenza dei vari organi meccanici con i quali è formato è peraltro anche assai irregolare e presenta risonanze ad antirisonanze.

Il campo di frequenza entro il quale il microfono conserva sensibilità apprezzabile varia tra 50 * 100 e 1500 * 2000 Hz.

Con una tensione di alimentazione di 4 * 5 volt, un microfono normale collegato ad un telefono pure di tipo normale può realizzare un comprensibile collegamento fino a 30 * 40 Km.

Il rendimento del microfono a polverino è assai alto e può anche superare l'unità. L'energia elettrica che si ricava tra gli estremi A e B della resistenza di utilizzazione non è però generata a spese dell'energia acustica che investe il microfono, bensì, per la quasi totalità, dalla sorgente di energia E. L'energia acustica "comanda" la erogazione di energia elettrica di E in modo analogo a quello che avviene per la potenza di griglia nei tubi, cioè il microfono a polverino è del tipo a rele, e quindi è irreversibile.

Le capsule microfoniche a polverino di carbone possono essere anche adoperate nei microfoni osteofonici e laringofonici. Questi tipi di microfoni servono nei locali rumorosi per separare il suono utile, che si desidera trasmettere, dal rumore perturbatore. L'organo mobile del microfono, generalmente a forma di bottone, viene appoggiato dolcemente sulla mascella (nei microfoni osteofonici), o sul collo in prossimità della laringe (nei microfoni larin-

gofonici). In tal guisa l'elemento che trasmette le perturbazioni al polverino è sufficientemente protetto contro i rumori esterni, mentre è in collegamento diretto con la sorgente della vibrazione utile.

Senza addentrarci in un esame approfondito di questi tipi di microfoni, giova solo far notare che l'andamento nel tempo della velocità è dello spostamento della mascella o della gola di chi parla non è simile all'andamento della pressione sonora all'uscita della bocca, perchè non sono ancora intervenute le risonanze delle cavità boccali e nasali, le quali hanno influenza notevolissima nella formazione della parola.

Per questa ragione il microfono osteofonico o laringofonico non può, per la sua stessa natura, dal punto di vista della comprensibilità della trasmissione dare risultati così soddisfacenti quanto quelli ottenibili da un microfono comune; solo è un sistema di ripiego che permette di assicurare delle comunicazioni sufficientemente comprensibili anche in locali dove il rumore parassita dà una sensazione molto maggiore di quella del suono da trasmettere.

§ 4) - Microfoni trasformatrici di energia.

Per la realizzazione di microfoni si possono sfruttare tutte le trasformazioni elettroacustiche; si hanno quindi i seguenti tipi di microfoni, tutti evidentemente reversibili:

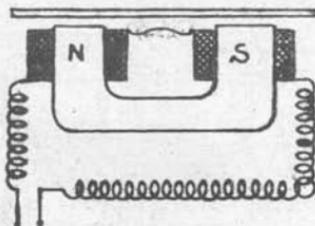


fig.69

magnetostatico, elettrostatico, elettrodinamico, piezoelettrico e magnetostrittivo.

Quest'ultimo tipo non è però praticamente mai usato per l'eccessivo peso ed ingombro rispetto alla sua sensibilità.

Il microfono magnetostatico può essere attuato in due maniere. Una prima maniera consiste nel disporre una membrana di materiale ferromagnetico affacciata ai poli di un piccolo magnete permanente a forma di U (fig.69) sul quale è avvolta una o due bobinette di n spire.

Il flusso che si concatena attraverso il magnete, il traferro compreso tra i poli del magnete e la membrana, varia, perchè col movimento della membrana investita dal suono varia alternativamente il traferro e quindi la riluttanza del circuito magnetico.

Nell'avvolgimento viene allora indotta una f.e.m. pari a $n \dot{\phi}$.

Questo microfono magnetostatico funziona esattamente nel modo inverso del telefono di uso corrente.

Esiste un'altra maniera di attuare un microfono magnetostatico. Tra i poli di due magneti permanenti (figura 70) può vibrare una ancorretta bilanciata o sulla quale è disposto un avvolgimento.

All'ancorretta è collegata, a mezzo di un asticella, una membrana M. La membrana, investita dall'onda sonora, vibra, trascinando con sé l'ancorretta che viene ad assumere posizioni alternativamente dissimetriche rispetto al traferro, e quindi un flusso alternativo si produce nel materiale ferro-

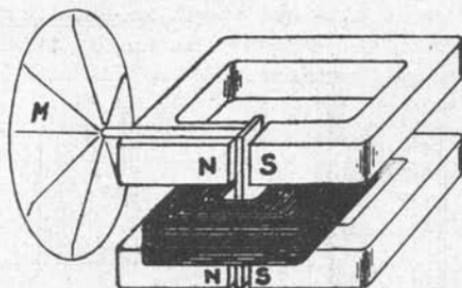


fig.70

magnetico dell'ancoretta. Nell'avvolgimento attorno all'ancoretta vengono indotte, di conseguenza, delle forze elettromotrici.

Questo tipo di microfono ha perciò l'ancoretta mobile non percorsa da flusso continuo, ma solo da flusso alternativo.

Può essere quindi più sottile e leggera, ed in conseguenza questo tipo di microfono, è più sensibile di quello precedente.

Il microfono elettrostatico è costituito da un elettrodo formato da una leggera membrana metallica m affacciata di fronte ad un robusto elettrodo metallico fisso F .

Questo tipo di microfono (fig.71) è assai delicato e non può sopportare trattamenti troppo rudi. Ciò alquanto limita il suo impiego nel campo della riproduzione.

La sua risposta è generalmente molto buona, ed inoltre è suscettibile di una taratura assoluta cioè, indipendente da altri campioni di riferimento. Queste proprietà lo rendono insostituibile per scopi di misura del campo sonoro, e di utilissimo impiego nel campo del laboratorio e dello "studio".

L'inserzione del microfono avviene più spesso come nel circuito schematizzato in figura 72, che si chiama circuito di bassa frequenza. La variazione di capacità provocate dal moto della membrana investita dal suono, genera una corrente i di carica e scarica del condensatore data dalla tensione di polarizzazione E . Tale corrente fluisce attraverso la resistenza R determinando una caduta di tensione alternativa tra i suoi estremi. Tra A e B è collegato l'ingresso di un tubo amplificatore posto in immediata vicinanza, il quale a sua volta è seguito da un amplificatore che può essere anche posto distante.

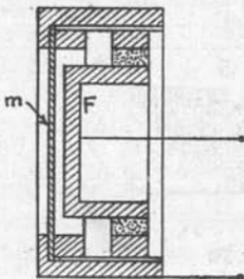


fig.71

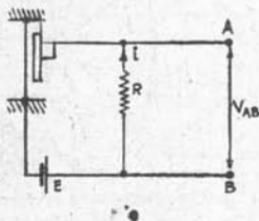


fig.72

Per effetto della pressione sonora $p = p_0 \text{ sen } \omega t$, la variazione di capacità, di ampiezza ΔC , è:

$$\Delta C \text{ sen } \omega t = k p_0 \text{ sen } \omega t,$$

dove k è un coefficiente di dimensioni F_m/Nw che determina, per un valore fissato della capacità statica C_0 , la sensibilità del microfono.

Applicando la seconda legge di Kirchhoff si ottiene:

$$E = R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_0 + \Delta C} \int i dt. \quad (\text{VII-1})$$

Quando R è molto grande di fronte a $\frac{1}{\omega C_0}$, e $2C_0$ è molto grande di fronte a ΔC , si può approssimativamente scrivere che:

$$V_{AB} = Ri = E \frac{\Delta C}{C_0} \text{ sen } \omega t \leq \frac{Ek}{C_0} p_0 \text{ sen } \omega t.$$

La caduta di tensione alternativa V_{AB} tra A e B è quindi proporzionale alla pressione sonora; non si deve però dimenticare che con le approssimazioni introdotte si sia senz'altro trascurate tutte le cause di distorsione, le qua

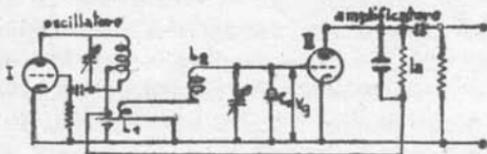


fig. 73

li invece comparirebbero eseguendo l'integrazione esatta della (VIII-1).

Questo circuito di utilizzazione del microfono è largamente usato, ed è il più semplice ed il più stabile.

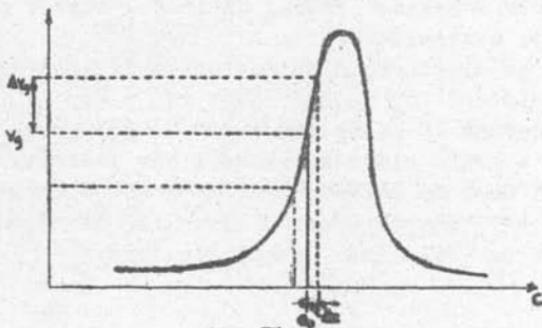


fig. 74

è possibile anche usare un microfono elettrostatico inserito nel circuito di fig. B (circuito ad alta frequenza). Un generatore di oscillazione ad alta frequenza (tubo I) induce in una bobina L_1 accoppiata al circuito oscillatorio una f.e.m. in un circuito oscillatorio $(L_1 + L_2) (C + C_0)$ il quale è leggermente disaccordato rispetto alla frequenza del generatore, da trovarsi circa su uno dei flessi della

curva di risonanza (fig.73). In parallelo a questo circuito è posto il microfono m ; le variazioni a frequenza acustica della sua capacità C_0 modulano in ampiezza la tensione che si localizza agli estremi del circuito con la stessa legge della pressione sonora che agisce sul microfono. Questa tensione modulata di alta frequenza viene applicata tra griglia e catodo di un tubo rivelatore; la tensione modulatrice a frequenza acustica che si ricava demodulando la tensione agli estremi del circuito anodico, è proporzionale alla pressione sonora del microfono, e può essere successivamente amplificata.

Il circuito ad alta frequenza, per la sua maggiore complicazione è raramente usato; solamente trova qualche applicazione negli strumenti di misura del campo sonoro.

La sensibilità dei microfoni elettrostatici è paragonabile a quella di ogni altro tipo di microfono e, se sono ben costruiti, hanno una ottima fedeltà ($+2\text{dB}$ entro $40-10.000$ Hz) e piccola distorsione non lineare. La direttività dipende dalla forma del microfono e se esso ha una forma esterna geometricamente semplice (sfera, cilindro, cubo), può essere teoricamente determinata.

In un microfono elettrostatico di tipo usuale la sua capacità statica C_0 è una 50 ± 100 pF; la R di $10 \pm 30\text{M}\Omega$ e la tensione E è di 100 ± 200 V. Poiché la sua impedenza interna è molto elevata, occorre che l'elettrodo immobile interno F sia accuratamente schermato e quello esterno mobile nel campo sonoro, cioè la membrana, sia connesso alla messa del tubo amplificatore.

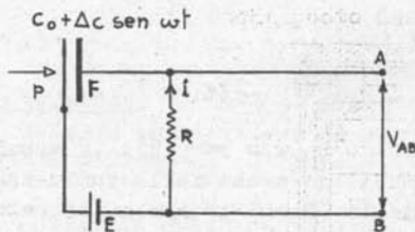


fig.75

Il microfono piezoelettrico. Sfrutta il fenomeno ononimo: se sulle facce di una piastrina opportunamente "tagliato" da un cristallo piezoelettrico (generalmente sale di Rochelle, detto anche sale di Seignette), si applica una pressione alternativa, si sviluppa una quantità di elettricità pure alternativa con legge simile alla pressione agente. Questa quantità di elettricità genera tra le facce del cristallo una d.d.p. di analogo andamento, suscettibile di essere amplificata. La risonanza meccanica della piastrina è a frequenza molto superiore alla gamma acustica da riprodurre, quindi lavorando fuori risonanza ha una risposta assai uniforme, crescente però al crescere della frequenza.

Il microfono piezoelettrico ha avuto in questi tempi una diffusione notevole, pur non essendo per ora entrato a far parte degli apparecchi microtelefonici correnti. Generalmente si usa una o più coppie di cristalli, collegati elettricamente in parallelo e meccanicamente in opposizione, sollecitati a flessione o torsione (fig.76), in modo da avere un certo sochermaggio rispetto alle influenze esterne.

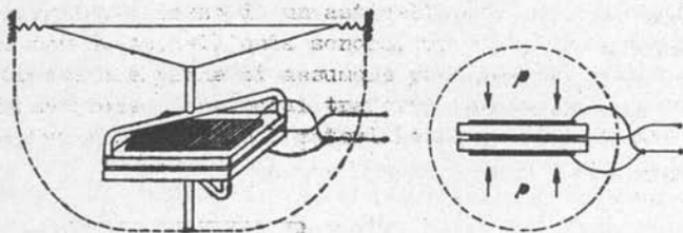


fig.76

Tale microfono ha una sensibilità assai elevata, ma è però assai instabile a causa della influenza della temperatura e dell'umidità. Esso, se meccanicamente protetto, è assai robusto ma, a causa della sua elevata impedenza interna, ha, in misura minore, lo stesso inconveniente del micro-

fono elettrostatico; cioè è necessario porre in sua vicinanza il primo tubo amplificatore.

La risposta sensibilità media nella gamma acustica del microfono piezoelettrico è assai elevata ($2 \div 5 \times 10^{-2} \text{Vm}^2/\text{Nv}$), specialmente se non vi sono membrane od altri sistemi meccanici collegati al cristallo, piccola è la distorsione non lineare, mentre la direttività, per la piccolezza del microfono, è generalmente assai modesta.

I microfoni elettrodinamici si possono distinguere in due tipi: microfoni a bobina mobile e microfoni a nastro. Nei primi l'onda sonora investe una membrana m , avente forma piana oppure di calotta sferica per irrigidirla alquanto, e ne determina il movimento. A questa membrana è rigidamente collegata una bobinetta cilindrica b (fig. 77) che viene trascinata su modo alternativo entro il traferro anulare di un magnete M .

Durante questo moto, l'avvolgimento di n spire della bobinetta taglia le linee di flusso ϕ radiali, e si induce una f.e.m. pari a $n \phi'$.

Nei microfoni a nastro un conduttore n largo e sottile a forma di "nastro" vibra, sotto l'azione diretta del suono, nel traferro di un magnete in direzione normale alle linee di flusso (fig. 78). In esso si induce parimenti una f.e.m. uguale a ϕ' .

La differenza dei due tipi di microfoni è puramente costruttiva. Il microfono a nastro è meno sensibile del microfono a bobina mobile, perchè in quello la lunghezza utile del nastro per evidenti ragioni di ingombro può essere al massimo qualche centimetro, mentre, in questo, la bobinetta può essere anche di molte spire. Tuttavia entrambi sono sempre seguiti da un trasformatore in forte salita.

Entrambi i tipi sono a velocità, e possono essere a pressione od a gradiente di pressione, a seconda della realizzazione costruttiva.

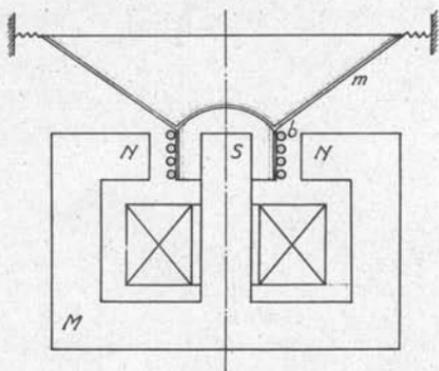


fig.77

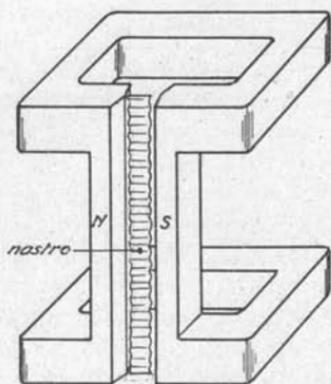


fig.78



Capitolo IX

T E L E F O N I

—oO—

§ 1) - Principi di funzionamento.-

Il ricevitore telefonico, o come più semplicemente si dice, il "telefono" è un trasmettitore elettroacustico atto a funzionare con potenza in gioco non superiore a qualche milliwatt.

Esso è generalmente di piccole dimensioni ed il suo impiego normale è in collegamento col canale auricolare; in tal guisa l'energia acustica che esso eroga si distribuisce in un ambiente di 2 * 3 centimetri cubi. *orecchio artificiale*

Tutti i principi di trasformazione di energia elettrica in meccanica ed acustica possono essere teoricamente sfruttati in un telefono, così come si fa per i microfoni.

I requisiti a cui deve soddisfare un telefono sono i seguenti:

- 1) Avere una riproduzione sufficientemente fedele, tale da permettere la comprensione della parola o al massimo la riconoscibilità della voce.
- 2) Un rendimento il più alto possibile, anche a scapito della distorsione lineare.

La risposta di un telefono si misura, in pratica a me

zo dell'orecchio artificiale, in Nw/m^2 per volt, o in barie per volt od in decibal al disotto di un determinato valore di riferimento.

Poichè nel telefono non deve essere in generale riprodotta la musica, e non si ricercano caratteristiche di alta fedeltà, basta controllare la curva di risposta solo entro la gamma di frequenza prescritta dal Comitato Consultivo Internazionale per le Comunicazioni Telefoniche (C.C.I.F) che è, 300 - 3000 Hz, per le gamma normale (in pratica 350-2700 Hz), 250 - 4000 Hz per la riproduzione di qualità (in pratica 200 - 3600 Hz) nella telefonia moderna a larga banda.

Non essendo di particolare interesse la distorsione lineare, si dispone in generale la risonanza principale del telefono nella zona centrale della gamma acustica da riprodurre, ottenendo, come è stato visto, un aumento del rendimento nell'intorno della frequenza di risonanza.

Perciò alcuni principi di funzionamento (ad es. elettrostatico, elettrodinamico, ecc.) nei quali, per ragioni costruttive, risulta la risonanza principale dell'organo ad una frequenza al di fuori della gamma acustica da riprodurre, non sono adoperati con vantaggio.

Il principio che ha dato i migliori risultati pratici è quello magnetostatico, sul quale è basata la costruzione della quasi totalità dei telefoni esistenti. Solo recentemente sono stati introdotti telefoni piezoelettrici i quali hanno qualche vantaggio rispetto a quelli magnetostatici per la migliore riproduzione delle più alte frequenze acustiche.

La tensione applicata ad un telefono magnetico varia da qualche millivolt a qualche volt.

Anche nel telefono la risposta viene ottenuta assai "spianata" entro la gamma di frequenza che interessa, sfruttando i vari fenomeni di risonanza dovuti alla presenza delle masse d'aria e della cavità risultanti dalla sua realizzazione costruttiva.

§ 2) - Teoria schematica del telefono magnetico.

Il telefono magnetostatico può essere a membrana mobi-

le attraversata dal flusso di corrente e ad ancoretta, analogamente ai corrispondenti tipi di microfoni. Il primo, per ragioni di solidità e di costo è enormemente più diffuso del secondo, il quale invece si impiega in generale in collegamento con l'identico microfono, a causa della loro mutua intercambiabilità.

In un telefono magnetostatico è facile determinare direttamente due relazioni indipendenti che regolano la trasformazione elettroacustica.

Si alimenti il telefono con una tensione alternativa sinusoidale $v = V_0 \text{ sen } \omega t$ di pulsazione $\omega = 2 \pi f$ e di ampiezza V_0 .

La corrente che circola nell'avvolgimento è definita in termini vettoriali (figura 79):

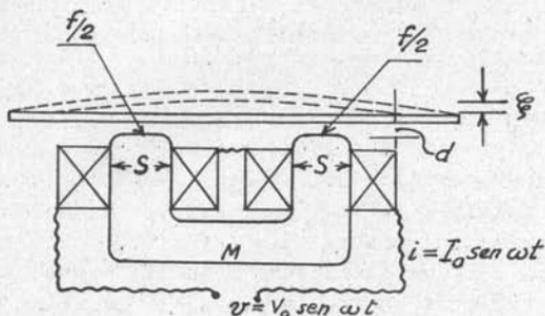


fig.79

$$v = Z_e I_0 \text{ sen } \omega t + e, \quad (\text{IX-1})$$

in cui Z_e è l'impedenza elettrica del circuito a lamina ferma che si chiama impedenza statica; I_0 l'ampiezza del-

la corrente ed e la contro f.e.m. indotta nel circuito dalla variazione di flusso magnetico provocata dal movimento della membrana.

La forma meccanica F che agisce sulla membrana è de finita dalla equazione:

$$F = \frac{2 S}{2 \mu_0} (B_0 + b)^2$$

in cui B_0 è l'induzione magnetica dovuta al magnetismo permanente del magnete M (polarizzazione), b il valore istantaneo dell'induzione dovuta alla corrente i che circola nell'avvolgimento del telefono, S la superficie di ciascuna delle due sezioni di passaggio del flusso e μ_0 la permeabilità del traferro ($\mu_0 = 1,25 \times 10^{-6}$ H/m).

Ponendo $b = B \text{ sen } \omega t$ si ha:

$$F = \frac{S}{\mu_0} (B_0^2 + 2 B B_0 \text{ sen } \omega t + B^2 \text{ sen}^2 \omega t) ,$$

$$F = \frac{S}{\mu_0} (B_0^2 + 2 B B_0 \text{ sen } \omega t + \frac{B^2}{2} - \frac{B^2}{2} \cos 2 \omega t) ,$$

si vede perciò che la forza F che sollecitata la membrana è composta da tre addendi: uno, indipendente dal tempo, che rappresenta una attrazione costante e non produce alcun suono; un secondo f che indica una forza alternativa con la stessa frequenza della corrente i eccitatrice; ed un

terzo termine che sollecita la membrana con frequenza doppia. Questo terzo termine dà la distorsione di seconda armonica esistente nel sistema elettromagnetico polarizzato.

Poichè si ha sempre $B_0 \gg B$, si può trascurare il terzo addendo rispetto al secondo, e la componente f diventa una grandezza alternativa sinoidale:

$$f = \frac{2 S}{\mu_0} B_0 B \sin \omega t .$$

Se ora si indica con \mathcal{R} la riluttanza del circuito magnetico in corrispondenza del valore massimo I_0 della corrente e con N il numero delle spire dell'avvolgimento, si ha:

$$B S = \frac{N I}{\mathcal{R}} \sin \omega t ,$$

da cui

$$f = \frac{2 N^2}{\mu_0 \mathcal{R}} I_0 \sin \omega t ; \quad f = A I_0 \sin \omega t , \quad (11-2)$$

ove il coefficiente A dipende dalle sole caratteristiche costruttive del telefono.

$$A = \frac{2 B_0 N^2}{\mu_0 \mathcal{R}} ,$$

prende il nome di fattore di forza. La (IX-2) è la prima delle equazioni che legano le grandezze elettriche a quelle meccaniche.

Uno spostamento ξ della membrana del magnete fa aumentare la riluttanza rispetto al valore \mathcal{R} che esiste a membrana ferma di $\frac{2\xi}{\mu_0 S}$; la riluttanza diventa quindi:

$$\mathcal{R}_{\xi} = \mathcal{R} + \frac{2\xi}{\mu_0 S},$$

ed il flusso magnetico, che è $B_0 S$ per $\xi = 0$, e si concatenava coll'avvolgimento, varia nel rapporto $\frac{\mathcal{R}}{\mathcal{R}_{\xi}}$ e diviene quindi:

$$\psi = B_0 S \frac{\mathcal{R}}{\mathcal{R} + \frac{2\xi}{\mu_0 S}} = B_0 S \left(1 + \frac{2\xi}{\mu_0 S \mathcal{R}}\right)^{-1}.$$

Dato che lo spostamento ξ della membrana è sempre piccolo di fronte al traferro d , il termine:

$$\frac{2\xi}{\mu_0 S \mathcal{R}} = \frac{2\xi}{d \xi}$$

è molto minore dell'unità, e per conseguenza, limitando lo sviluppo in serie ai primi due termini, si ha:

$$\psi = B_0 S \left(1 - \frac{2 \xi}{\mu_0 S R} \right) ;$$

ed il valore istantaneo e della contro f.e.m. indotta risulta:

$$e = - N \dot{\phi} = \frac{2 B_0 N}{\mu_0 R} \xi' ;$$

da cui:

$$e = A \xi' . \quad (IX-3)$$

Questa è la seconda equazione cercata che lega le grandezze elettriche a quelle meccaniche od acustiche.

Il movimento della membrana è definito dalla caratteristica meccanica delle parti mobili del telefono. In esso si può assimilare la membrana ad un sistema meccanico semplice, costituito da una massa equivalente \underline{m} , concentrata nel suo punto centrale, che si muove con una rigidezza equivalente \underline{h} , incontrando una resistenza meccanica \underline{a} composta dalla somma degli attriti e della resistenza di radiazione, sotto l'azione della forza f .

L'impedenza meccanica Z_m in modulo e fase risulta espressa dalla relazione:

$$Z_m = \frac{f}{\xi'} = a + j \left(\omega m - \frac{h}{\omega} \right) .$$

Dall'espressione (IX-2), l'equazione meccanica del telefono si scrive semplicemente

$$Z_m \xi' = A I_0 \sin \omega t ,$$

e, per la (IX-1) si ha infine:

$$v = \left(Z_e + \frac{A^2}{Z_m} \right) I_0 \sin \omega t = Z_d I_0 \sin \omega t , \quad (\text{IX-4})$$

la quale indica che la impedenza Z_d equivalente elettrica del telefono funzionante si può considerare come la somma dell'impedenza statica Z_e , che si ha a membrana ferma, e di una impedenza "dinamica" $\frac{A^2}{Z_m}$ dovuta al movimento della membrana.

Il fattore di forza A definisce la sensibilità del telefono; generalmente un telefono è tanto migliore quanto più alto è il valore di A .

Si vede facilmente che, se A è costante e sono costanti i parametri a , m e h dell'impedenza meccanica Z_m , il modo di variare dell'impedenza "dinamica" in funzione della pulsazione ω è rappresentabile con un diagramma circolare (cerchio mozionale) i cui punti danno, per ogni frequenza x_1 (reattiva) ed r_1 (resistiva) dell'impedenza dinamica Z_d .

Questo cerchio (fig.80) che passa per l'origine O , e ha il suo centro C sull'asse reale, ha per diametro OD il valore A^2/a della impedenza dinamica corrispondente al minimo di impedenza meccanica, cioè alla condizione

di risonanza meccanica. Si tenga presente che Z_d , come Z_e e Z_m è una quantità complessa.

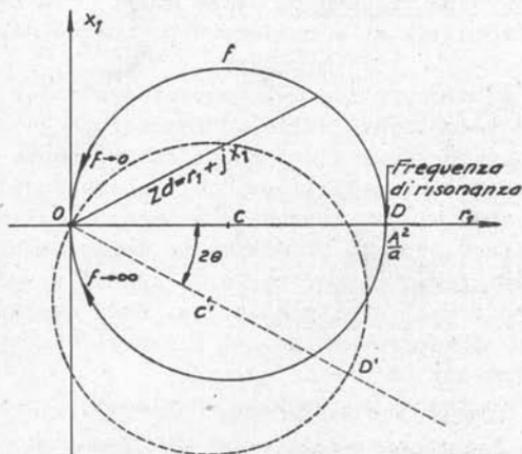


fig.80

Il comportamento del telefono in base alle considerazioni sopra esposte non corrisponde tuttavia esattamente a quanto si può ricavare da misurazioni dirette. Infatti il diagramma vettoriale di variazione dell'impedenza dinamica al variare della frequenza si avvicina notevolmente ad un cerchio, il quale ha il centro C' situato sopra una retta uscente dall'origine che forma (nel verso negativo) un angolo 2θ coll'asse reale; il diametro del cerchio CD , rappresenta ancora A^2/a e definisce la condizione di risonanza della membrana, è quindi una quantità complessa con un angolo di fase.

Considerare il fattore di forza A come grandezza (con angolo θ di fase), significa ammettere che la forza f sia sfasata in ritardo dell'angolo θ rispetto alla corrente che la provoca.

Ciò si spiega ammettendo la presenza di isteresi e di

correnti parassite, indotte nella massa dei poli del magnete e nella membrana.

L'approssimazione più importante introdotta è tuttavia l'aver supposto che la membrana telefonica sia assimilabile ad una massa, una elasticità ed una resistenza concentrate. In realtà ciò non è, e questo porta ad avere in pratica diverse risonanze, delle quali, con la schematizzazione introdotta, si considererebbe invece solo la fondamentale.

Lo studio pratico del comportamento del telefono deve ancora tener conto della conferma geometrica e della costituzione fisica dei corpi in vicinanza della membrana, in specie del padiglione, col canale auricolare i quali, come si è visto, provocano mutamenti della resistenza di radiazione opposta al movimento della membrana stessa.

I diagrammi circolari, o di Kennelly, sono di impiego frequente nell'elettroacustica. Essi compaiono tutte le volte che si rappresentino nel piano di Gauss, le componenti dell'inversa di una impedenza.

Ad esempio: la quantità complessa $Z = x_0 + j y (\omega)$ è rappresentata nel piano di Gauss $x y$, da una retta parallela all'asse delle y (figura 81) passante per il punto x_0 , ed il punto generico P rappresentativo del parametro ω dista dall'origine della quantità $Z = \sqrt{x_0^2 + y^2}$.

Il luogo dei punti P' giacenti sulla retta OP , tali che sia $OP = (x_0^2 + y^2)^{-1/2}$ è un cerchio tangente in O all'asse delle y , con centro C su x a distanza $\frac{1}{2 x_0}$ da O . Infatti le coordinate di P' , $x' = x_0 / |Z|^2$ e $y' = y / |Z|^2$ verificano l'equazione del cerchio suddetto:

$$\left(x' - \frac{1}{2 x_0}\right)^2 + y'^2 = \left(\frac{1}{2 x_0}\right)^2$$

$$\left(\frac{x_0}{|Z|^2} - \frac{1}{2x_0} \right)^2 + \left(\frac{y}{|Z|^2} \right)^2 = \frac{1}{4x_0^2} .$$

Come è immediato verificare, eseguendo gli sviluppi.

In generale si può affermare che se un punto rappresentativo di un numero complesso si muove nel piano di Gauss descrivendo una retta, il punto avente modulo inverso a fase contraria si muove descrivendo un cerchio (cerchio di Kennel_{ly}).

Nei circuiti elettrici con risonanze, alimentati a tensione costante V la corrente $I = V / |Z|$ varia appunto nel modo suddetto. Altrettanto avviene per le velocità degli organi mobili di circuiti meccanici, alimentati con forza costante, ed in innumerevoli altri casi in diverse condizioni di alimentazione e di risonanza.

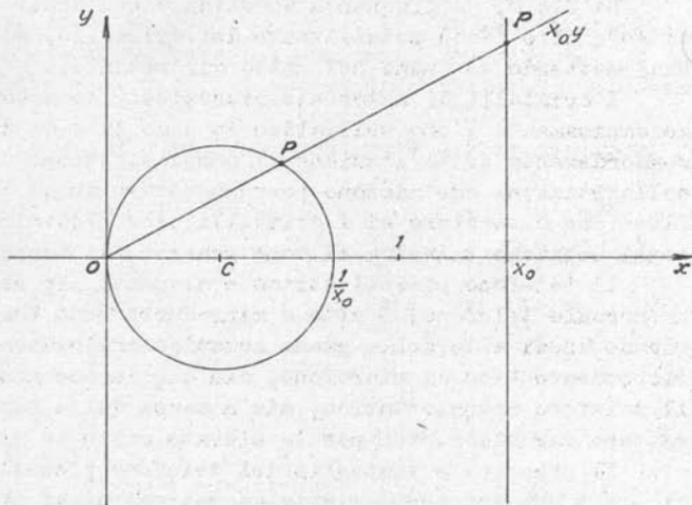


fig.81

Dalla (IX-4) si osserva inoltre che il circuito equivalente elettrico al circuito risonante meccanico in serie, è un circuito elettrico in parallelo da disporsi in serie al circuito elettrico effettivamente esistente.

I telefoni elettromagnetici sono ora costruiti in "capsule" ben serrate, apribili o meno, per avere la massima garanzia di funzionamento. Quando debbono essere usati in locali rumorosi, sono muniti di padiglione di gomma per meglio aderire all'orecchio e quindi schermarlo dai rumori esterni.

§3) - Telefono piezoelettrico.

Il telefono piezoelettrico è costituito da 2 sottili cristalli di materiale piezoelettrico, incapsulati entro carcasse di bachelite di forma del tutto analoga a quella dei comuni telefoni elettro-magnetici.

La f.e.m. a frequenza acustica viene applicata direttamente alle facce metallizzate del cristallo, ed esso vibra emettendo un suono nel mezzo circostante.

I cristalli di materiale piezoelettrico sono connessi meccanicamente l'uno sull'altro in modo tale da deformarsi concordemente sotto l'azione di campi elettrostatici. Le sollecitazioni che nascono possono essere anche di pressoflessione o torsione ed i cristalli piezoelettrici così connessi prendono talvolta il nome generico di "coppia bimorfa".

Il telefono piezoelettrico è alquanto più sensibile di un normale telefono; è atto a riprodurre bene anche le frequenze assai alte della gamma acustica analogamente al corrispondente tipo di microfono, ciò che invece non può fare il telefono magnetostatico, sia a causa delle perdite di carattere magnetico, sia per le elevate masse in giuoco.

Il principale vantaggio del telefono piezoelettrico è di avere una impedenza elettrica interna assai alta, tale da non turbare troppo i circuiti sui quali viene inserito; questa impedenza è capacitiva, mentre nel telefono magnetostatico l'impedenza è induttiva; inoltre il telefono pie-

zoelettrico è più leggero di quello elettromagnetico, ma assai più fragile.

Nelle prove di telefoni bisogna tener presente la necessità che questi siano collegati ad una piccola camera ($2 + \text{cm}^3$), che riproduca approssimativamente le reali condizioni di impiego.

Questo dispositivo prende il nome di orecchio artificiale.

L'orecchio artificiale, se non ha alcun forellino di comunicazione con l'esterno prende il nome di "orecchio duro" se ha un piccolo forellino del diametro di circa 1 mm. e di lunghezza di un paio di centimetri prende il nome di "orecchio semiduro" (fig.82) che simula le fughe di aria per imperfetto combaciamento del padiglione telefonico nell'orecchio, se il foro è di diametro maggiore e ve ne sono diversi, si chiama "orecchio molle". Questo corrisponde a diversi modi di impiego del telefono a seconda che esso aderisca più o meno al padiglione dell'orecchio umano.

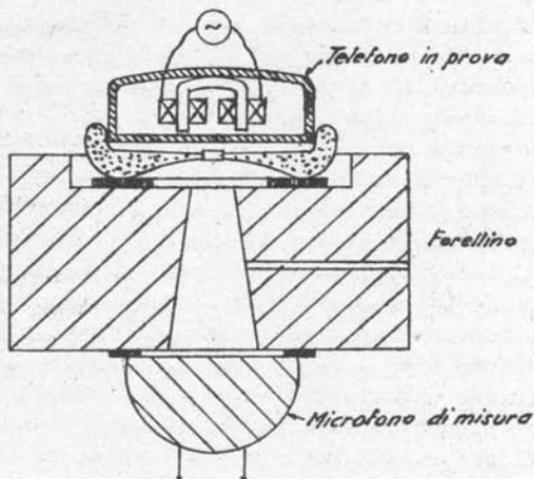


fig.82

L'estremità opposta del canale dell'orecchio duro è chiusa dal microfono campione tarato, generalmente un microfono elettrostatico.

Anelli di gomma assicurano la tenuta esatta del telefono in prova e del microfono tarato. Il materiale dell'orecchio artificiale può essere metallo o legno.

o o o o o o

o o o o

o o

o

Capitolo X

IMPIANTI TELEFONICI

—oOo—

§1) - Generalità.-

Non è questa la sede per esporre le caratteristiche degli impianti telefonici in genere, i quali costituiscono una sviluppatissima branca della tecnica in permanente e rapida evoluzione, e sulla quale convergono enormi interessi.

Basti solo accennare che, dalle prime comunicazioni a grande distanza a frequenza vocale su conduttore aereo, si è oggi passati ad impianti a radiofrequenza in cavo sotterraneo sui quali è possibile convogliare oltre 600 comunicazioni contemporanee. Anche la telegrafia, una volta così nettamente distinta dalla telefonia, oggi si va amalgamando con essa, tanto che la massima parte delle installazioni servono per l'una e per l'altra, con la sola distinzione di alcuni dispositivi terminali.

Di tutto questo verrà fatto un cenno riassuntivo in seguito.

A bordo di navi, poichè le ragioni di ingombro e le scarse distanze in giuoco rendono superflue molte realizzazioni.

PAOLINI - Acustica ed Elettroacustica29

zioni tecniche che si trovano negli impianti terrestri a grande distanza, sussistono installazioni di tipo molto più semplice, operanti solo a frequenza vocale, ove non è in generale necessario nessuno dei semplici accorgimenti che normalmente si trovano nei circuiti che hanno lunghezza di qualche chilometro.

E' rarissimo il caso che, in impianti di bordo, si abbia a che fare con linee pupinizzate o krrarupizzate, con traslatori, con amplificatori di linea e soppressori di eco, con vodas, ad altri dispositivi, ben noti dallo studio delle comunicazioni elettriche su filo.

Per contro occorrono requisiti di maggiore solidità, robustezza ed inalterabilità, ^{Gli impianti} essendo di bordo sottoposti a più intensi agenti atmosferici ed a maggiori sollecitazioni meccaniche di quanto non lo siano gli impianti in terraferma.

Vengono qui brevemente riportati i circuiti semplici usati nei telefoni di bordo, senza entrare nei dettagli delle innumerevoli commutazioni manuali che sono richieste al fine di effettuare vari collegamenti diretti, con la stessa rete.

Una rete di bordo, non centralizzata, è costituita in pratica solo da apparati terminali e da linee, potendo ogni operatore chiamare direttamente quello degli utenti della stessa rete che interessa attraverso relè contenuti in generale negli stessi apparecchi terminali.

I microfoni degli impianti telefonici per ovvie ragioni di sensibilità sono, salvo qualche eccezione, del tipo a polverine di carbone, ed i telefoni sono magnetostatici.

Una apparecchiatura telefonica terminale comprende un microtelefono e, dentro una carcassa di lamierino piegato, o di fusione contenente diversi organi, la suoneria, il generatore per la suoneria, i pacchi di molle, il trasformatore microfonico (detto anche bobina di induzione), il condensatore, la lampadina spia, i relè, il disco combinatorio, ecc. La rappresentazione grafica di alcuni di questi elementi è indicata in figura 84.

Vengono qui riportate le classificazioni tuttora valide degli impianti telefonici.

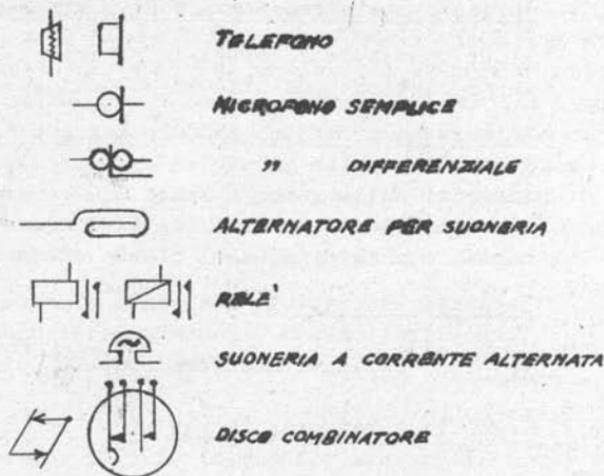


fig.84

§2) - Impianti telefonici.-

Gli apparecchi telefonici a seconda del sistema di alimentazione microfonica possono dividersi in:

- a) - Impianti a batteria locale, nei quali presso ogni utente sono installate batterie, che funzionano qua li sorgenti locali di energia. La chiamata viene ef fettuatata dall'utente mediante un generatore magneto-elettrico;
- b) - Impianti a batteria centrale, nei quali l'alimentazione è ottenuta da un'unica batteria di accumulatori posta in centrale. In questi apparecchi la chiamata della centrale viene eseguita da parte dell'ab bonato distaccando semplicemente il ricevitore o il microtelefono dal gancio. Gli apparecchi a batteria centrale si suddividono a loro volta in:

- b₁) - Impianti a sistema manuale di centrale, nei quali un operatore effettua, in centrale, i collegamenti richiesti da ciascun abbonato;
- b₂) - Apparecchi a sistema manuale dal posto, nei quali l'utente sceglie il suo interlocutore, tra i pochi inseriti sulla rete, a mezzo di una serie di relè connessi ad altrettanti contatti comandati con pulsanti, o chiavette, dall'utente stesso;
- b₃) - Impianti automatici, nei quali ciascun utente ottiene direttamente, manovrando il disco combinatore, il collegamento desiderato.

L'apparecchio a batteria locale viene comunemente adoperato per collegamenti telefonici diretti o per telefoni da campo; la figura 85, rappresenta lo schema di principio di un collegamento fra due di questi apparecchi.

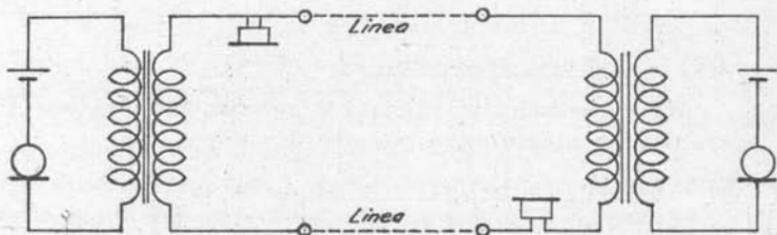


fig.85

I microfoni impiegati in questi apparecchi sono a bassa resistenza interna (da 30 a 50 ohm) ed il trasformatore microfonico, che deve adattare al microfono l'impedenza di linea ha un rapporto di trasformazione assai elevato (4 a 10).

Il trasformatore microfonico rende il circuito del microfono indipendente dalla resistenza elettrica del ricevi-

tore e dalla linea.

Le figure 86, 87, 88, mostrano i circuiti completi degli organi ausiliari, dei tre tipi comunemente adottati di telefoni a batteria locale, e cioè rispettivamente: l'apparecchio in serie; l'apparecchio in derivazione; l'apparecchio con montaggio composto.

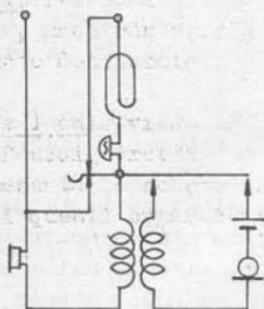


fig.86

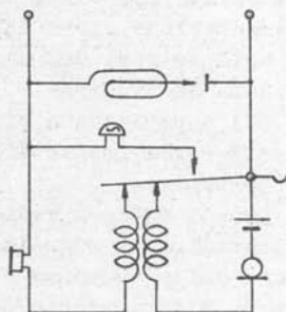


fig.87

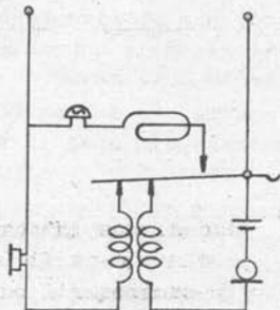


fig.88

Dall'esame delle figure risultano quali siano il circuito di chiamata, cioè quello che risulta allorchè il ricevitore è appeso al gancio, e il circuito di conversazione che risulta allorchè il ricevitore è distaccato dal gancio, come è indicato in figura.

Nel tipo di apparecchio a batteria centrale, non occorrono invece nè pile per l'alimentazione locale, nè il generatore magnetoelettrico per la chiamata. Nella centrale telefonica è sistemata una batteria di accumulatori (tensione di solito 24, o 36, o 40, o 60 volt), che serve sia per l'alimentazione microfonica, sia per la chiamata. In realtà però agli estremi del microfono non si ha più di 4 o 5 volt di caduta di tensione.

Gli apparecchi a sistema manuale di centrale sono molto usati negli impianti interni di edifici, e nelle piccole reti terrestri.

Questa avviene mediante un indicatore di chiamata ad es. lampadina di segnalazione, sistemata in centrale ed azionata dalla corrente continua che circola sulla linea attraverso l'apparecchio telefonico, quando l'utente solleva il gancio.

Gli apparecchi a sistema manuale dal posto sono usati a bordo e costituiscono la maggior parte delle reti su una nave. La caratteristica a cui devono soddisfare è lo scarso numero di utenti (non oltre una diecina) inseriti su ogni rete, per non dar luogo ad eccessiva complicazione nei relè di smistamento, comandati da ogni posto telefonico.

Come si è detto, non si riportano nelle figure schematiche i collegamenti dei relè operanti la comunicazione tra vari utenti dell'utente chiamante.

La figura 89 mostra uno schema molto semplice di telefono a batteria centrale. In esso il microfono e il ricevi-

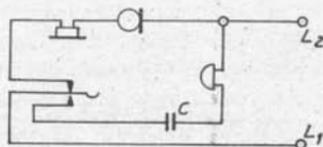
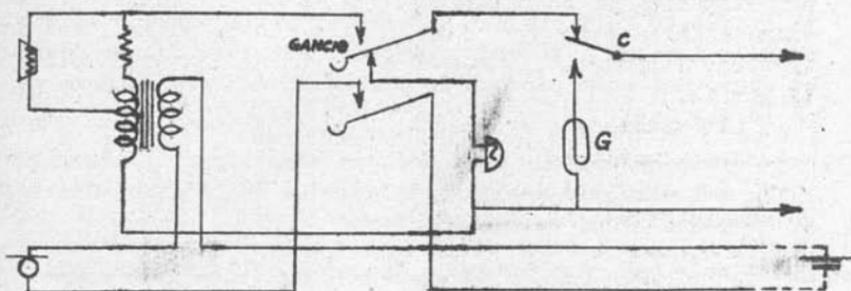


fig.89

tore, che è del tipo a corrente continua, sono disposti in serie sul circuito di linea. Questo schema di circuito in serie viene adottato solo per linee brevi, poichè su linee lunghe la corrente a frequenza fonica che attraversa la bobinetta del ricevitore potrebbe essere insufficiente per una adeguata eccitazione del ricevitore stesso.

In tipi più moderni di apparecchi a batteria centrale si è cercato di annullare o per lo meno ridurre al minimo, mediante appositi circuiti antilocali, il cosidetto effetto locale ossia la ricezione della propria voce o dei suoni nel locale dove si trova l'apparecchio.

In figura 90 è indicato uno schema di apparecchio a batteria centrale a 4 conduttori, assai usato, in cui è ridotto l'effetto locale a mezzo del trasformatore a presa centrale tra microfono e telefono.



C = CONTATTO CHE SI ABBASSA RUOTANDO IL GENERATORE G

fig.90

La figura 93 mostra il circuito di conversazione fra due utenti collegati alla stessa centrale e corrisponde ad un tipo fra i più comuni di inserzioni della batteria. Le bobine di impedenza colleganti gli estremi della batteria ai conduttori di linea permettono il passaggio della corrente continua di alimentazione; invece i condensatori se-

paramo i due circuiti a corrente continua e permettono il passaggio della componente alternata della corrente ondulata fonica, alla quale le bobine di impedenza impediscono il passaggio verso la batteria. Ciò è indispensabile per evitare il miscuglio delle conversazioni contemporanee di tutti gli utenti alimentati dalla batteria, e quindi con cadute di tensione in comune nella resistenza interna della batteria stessa.

§ 3) - Reti telefoniche di bordo.-

In una grande nave vi sono generalmente non meno di una dozzina di reti telefoniche indipendenti: automatiche, semiautomatiche, manuali o dirette. In una nave minore molte di queste reti possono mancare ed altre possono essere riunite insieme a seconda dei casi. Le reti che si possono avere nel caso più completo, cioè su una grande nave sono le seguenti:

- a) - rete generale - essa collega utenti per il disbrigo del servizio nella vita normale della nave. Generalmente è una rete automatica.
- b) - rete apparato motore e dinamo - collega tutti gli utenti relativi al servizio di macchine, caldaie e generatrici elettriche. I microfoni sono spesso osteofonici stagni.
- c) - rete vedette e proiettori - serve per il servizio di avvistamento, ed ha il centralino posto nei pressi della plancia. Collega con la plancia tutte le vedette, i proiettori, i rilevatori ed i servizi relativi ai proiettori.
- d) - rete linee dirette tiro e lancio. E' costituita da collegamenti diretti dei vari utenti delle artiglierie; es. fra il 1° e il 2° DT con la centrale principale del tiro; fra la centrale tiro AS con le stazioni

AS; fra le stazioni AS ed i complessi di artiglieria da 100; fra le torri ed i relativi depositi; fra la plancia e la torretta di lancio, ecc.- I microfoni e gli organi di chiamata dei locali munizioni sono esclusivamente senza batteria in modo che tutto il posto microtelefonico non offre pericolo di scintillamento.

- e) - Rete di manovra - essa collega la plancia con vari punti della nave dove esistono stazioni di manovra. Per es. il posto di manovra principale con il locale della bussola normale, della girobussola, della camera ordini, del locale macchine, del locale timone a mano ecc.
- f) - Rete centrale delle comunicazioni - collega la centrale comunicazioni con i locali: radiosegnalatori, idrofoni, stazioni RT, stazione segnali AV, stazione segnale AD, plancia comando, ufficio cifra, ecc.-
- g) - Rete ordini collettivi - costituita da due apparecchi trasmettenti uno in plancia e l'altro presso lo Ufficiale di guardia, collegati in permanenza, a mezzo di altoparlanti con tutti i locali della nave. Serve a trasmettere ordini simultaneamente in ogni punto della nave. Può avere speciale impiego per la difesa antigas ed in caso di avarie gravi.
- h) - Rete generale tiro e lancio - ha il centralino nella centrale tiro. Collega tra di loro tutti gli utenti più importanti del servizio di artiglieria: direttori del tiro, centrali di tiro, torri e complessi di coperta, ecc.-
- i) - Rete galleggiamento - essa collega con la centrale di galleggiamento i vari punti di manovra relativi a tale servizio.
- l) - Rete direttori di tiro e lancio - collega fra l'altro la plancia col il primo DT, coi direttori di lancio D e S, con i direttori di tiro AA e con le torri alte.
- m) - Rete ordini tiro principale - permette di trasmette-

re ordini senza risposta dai direttori del tiro e dalla centrale principale alle torri. I ricevitori sono ad altoparlanti ed a cuffia. Il centralino è stagno ed automatico.

- n) - Rete ordini tiro secondario - essa permette di trasmettere ordini dalle stazioni centrali del tiro secondario ed antiaereo ai complessi di coperta. I ricevitori sono a cuffia, il centralino è generalmente semiautomatico.

Le sigle regolamentari del materiale microtelefonico di bordo sono le seguenti:

M - Microfono
T - Telefono
S - Stagno
O - Osteofonico
d - Diretto
t - Tasto
a - Automatico
i - Intercomunicante
C - Cuffia
AP - Altoparlante.

Un numero rappresenta il numero delle linee; ad es. lo apparecchio " MTSO2i " significa: microtelefono stagno osteofonico a due linee dirette. I microtelefoni di bordo sono di tipi regolamentari che ammontano a diverse decine, tutti avanti circuiti analoghi. Schematicamente un collegamento microtelefonico di bordo con microfoni differenziali è indicato in figura 91, nella quale non sono segnati gli organi di chiamata e di commutazione. Il funzionamento è di comprensione immediata seguendo le connessioni dello schema.

Nella tavola è riportato, a titolo di esempio, un collegamento completo tra due microtelefoni diretti a tre fili, con la cassetta di derivazione posta in vicinanza della sorgente di forze elettromotrici dello impianto. La chiamata è a pulsante. Può esservi, oppure mancare come in tutti i ti-

pi di telefoni, il relè per la permanenza del segnale di chiamata.

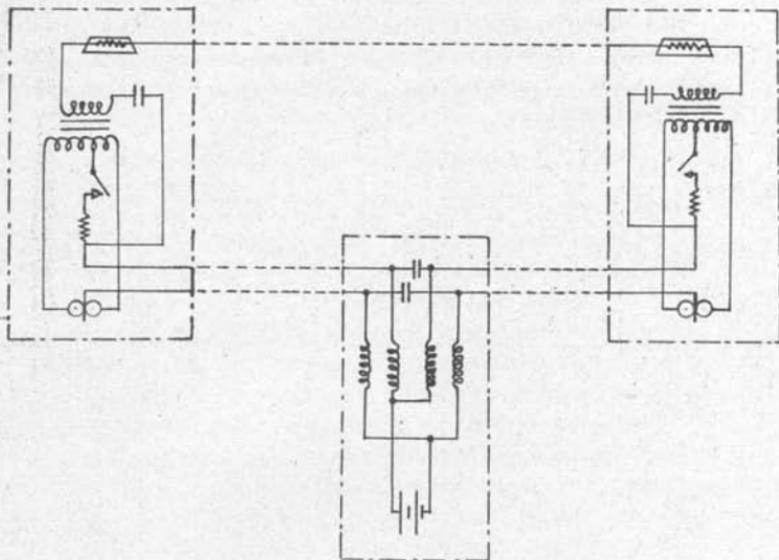


fig.91

Esistono apparecchi telefonici con più pulsanti, nei quali è possibile effettuare la chiamata di diversi corrispondenti insieme, e comunicare contemporaneamente con essi, tutti collegati fra di loro in parallelo.

§4) - Circuiti virtuali e telefonia speciale.-

Per un maggiore sfruttamento dei conduttori esistenti fra due punti fissi, si impiegano spesso, nelle installazioni terrestri, i circuiti "virtuali" o "fantasma".

Riferendosi ai soli conduttori relativi alle correnti foniche, cioè non essendo indicati gli organi di chiamata, il tipico circuito virtuale per tre conversazioni contemporanee è schematicamente indicato in figura 92.

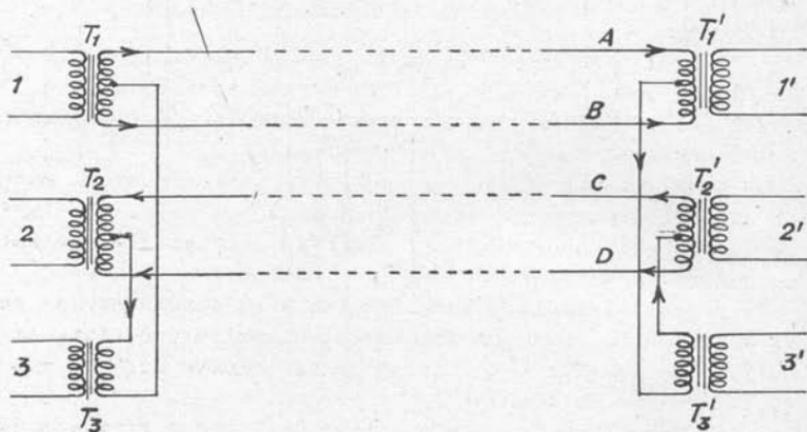


fig.92

La conversazione tra i posti 1 ed 1' è assicurata dai conduttori di linea A e B; la comunicazione tra i posti 2 e 2' è assicurata dai conduttori C e D; tra la coppia di conduttori A, B in parallelo e la coppia di conduttori C, D in parallelo ha luogo una comunicazione effettuata dai posti 3 e 3'. Quest'ultima comunicazione non turba le prime due, pur sovrapponendosi ad esse sulle linee, in virtù delle prese centrali dei secondari dei trasformatori.

T_1, T'_1, T_2, T'_2 .

Naturalmente per ottenere questo risultato occorre un buon bilanciamento delle quattro linee, cioè la simmetria elettrica deve essere assicurata in grado molto elevato sia per i trasformatori terminali sia per le linee in tutta la loro lunghezza, specialmente se si tratta di linee in cavo. Su n conduttori, non usando come generalmente si fa, alcun ritorno per la terra, si possono effettuare $n/2$ comunicazioni su circuiti reali ed $n/4$ comunicazioni su circuiti virtuali: in tutto $3/4$ di n comunicazioni contemporanee.

Se sui circuiti reali si fa una comunicazione a frequenza fonica (300 - 3000 Hz) ed una a frequenza trasporto (3500 - 6500 Hz) si possono avere in tutto $5/4 n$ comunicazioni contemporanee su n conduttori.

Sono stati fatti anche tentativi per una ancora maggiore utilizzazione dei conduttori fisici, attraverso l'impiego di circuiti supervirtuali od altri dispositivi speciali, ma generalmente senza pratica applicazione.

Nella telefonia a lunga distanza vi sono numerose cause di disturbo, che con una accurata costruzione vengono molto ridotte. Tra le principali è da annoverarsi il rumore di fondo e la diafonia.

Il rumore di fondo è misurato dal valore efficace della tensione disordinata di fluttuazione che si sviluppa tra i conduttori di una linea a causa della presenza degli amplificatori lungo la linea e dei parassiti esterni che giungono a farsi sentire in qualche punto del circuito.

La diafonia è misurata dalla differenza di potenziale che si induce comunque (capacitivamente, induttivamente o resistivamente) in una linea, allorchè esista una d.d.p. su un'altra linea vicina utilizzata in una comunicazione normale.

La diafonia può essere intelligibile od inintelligibile, cioè tale per cui si possa o non si possa comprendere la conversazione che si sta svolgendo su qualche circuito vicino. Quando la diafonia è tra molti circuiti reali o virtuali contemporaneamente e varie comunicazioni si stanno svolgendo pure contemporaneamente, la diafonia che ne ri-

sulta è certamente non intelligibile.

Sia il rumore di fondo che la diafonia, in un buon collegamento a lunga distanza, debbono essere, agli estremi della stazione ricevente inferiori almeno di 60 db ad 800 Hz alla d.d.p. media che si ha in una normale conversazione che è 0,77 V su un carico resistivo di 600.

Tale potenza di riferimento della normale conversazione telefonica, su linea con impedenza di utilizzazione uguale alla media delle impedenze delle normali linee telefoniche, è pari ad 1 mW. Le effettive variazioni positive o negative, nei vari punti del circuito, espresse in decibel, del segnale, o livello, rispetto a quello di riferimento, per effetto delle attenuazioni e delle amplificazioni, si chiama equivalente di trasmissione della conversazione telefonica.

Nei luoghi dove si ha a disposizione una rete ad alta tensione per la trasmissione di energia, si possono impiegare per le comunicazioni telefoniche i conduttori della rete stessa inducendo su di esse delle tensioni ad alta frequenza nel campo delle onde lunghe, modulate dalle frequenze foniche. Le tensioni ad alta frequenza si propagano così lungo tutta la rete e sono suscettibili di essere "ricevute" in un punto qualsiasi della rete stessa. Questo sistema di impianti prende il nome di telefonia ad onde convogliate.

Il sistema in principio non differisce da una trasmissione ad alta frequenza, ma vi è in aggiunta la connessione tra il complesso telefonico e la rete che di solito si fa per mezzo di un'antenna accoppiata capacitivamente ad uno dei conduttori di rete. Una notevole complicazione si ha nei circuiti di filtro e negli organi di chiamata. Questi tipi di impianti hanno una certa diffusione nei collegamenti telefonici tra luoghi riforniti da una stessa rete di distribuzione di energia, quali ad es. costruzioni montane relative ad impianti idroelettrici, luoghi serviti da linee ferroviarie elettrificate, ecc.-

In certi casi interessa che una conversazione telefonica non possa venire in alcun modo capita né per diafonia, né da una eventuale intercettazione lungo i conduttori. Esistono vari sistemi per rendere segreta la conversazione (la modulazione di un'alta frequenza è già di per sé un meccanismo segreto), il più semplice e diffuso è quello dell'inversione di frequenze della gamma fonica.

Il suo funzionamento è fondato sul seguente principio: le frequenze foniche f comprese in un intervallo ben definito, ad es. 0 - 3000, si fanno "interferire" con una frequenza fissa f_0 pari all'estremo superiore dell'intervallo, generata da un oscillatore locale, per mezzo di una mescola-

zione effettuata da tubi. Si generano allora le frequenze somma $f_0 + f$ e le frequenze di differenza $f_0 - f$.

A mezzo di filtri passa-basso si trasmettono ad esempio, le sole frequenze di differenza $f_0 - f$ lungo i conduttori di linea. Nella stazione di arrivo si eseguisce una seconda mescolazione fra le frequenze invertite $f_0 - f$ ed una frequenza localmente generata pari proprio ad f_0 . Si generano perciò le frequenze $f_0 - (f_0 - f) = f$ ed $f_0 + (f_0 - f) = 2f_0 - f$.

Le seconde, con opportuni filtri, possono essere separate dalle prime, le quali sono appunto le frequenze componenti lo spettro del suono di partenza.

I sistemi di telefonia segreta, quantunque assai complessi per la presenza di filtri assai critici, hanno una notevole diffusione specie nelle reti telefoniche militari.

§ 5) - Telefonia automatica.

Qualche indicazione maggiore deve essere data per gli impianti a batteria centrale automatici, i quali costituiscono la maggior parte delle installazioni su terraferma e si stanno sempre più sviluppando anche a bordo.

Gli apparecchi a batteria centrale automatici hanno l'aggiunta del disco combinatore, il quale introduce nel circuito elettrico un contatto a molle in serie sulla linea (molle degli impulsi), e uno o due contatti a molle che durante la chiamata cortocircuitano il microfono e il telefono (molle di corto circuito) fig. 94.

Il disco combinatore è appunto l'organo caratteristico dei telefoni automatici. Esso comanda a distanza gli organi di selezioni situati in centrale, trasmettendo sulla linea un numero conveniente di impulsi, ottenuti aprendo e chiudendo un determinato numero di volte e in un determinato modo il circuito elettrico di linea percorso dalla corrente di alimentazione microfonica.

Più precisamente, ogni interruzione del circuito di linea costituisce un impulso di apertura, cui segue il corrispondente impulso di chiusura, col quale si ristabilisce il circuito; si dice impulso completo o semplicemente impulso il complesso di un impulso di apertura e di un im-

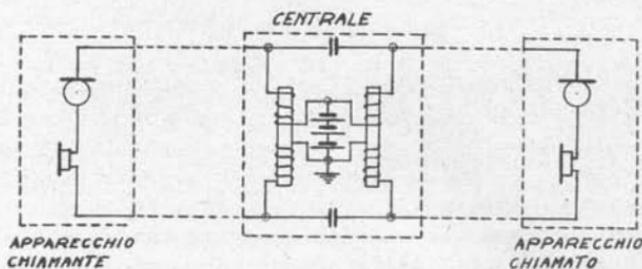


fig.93

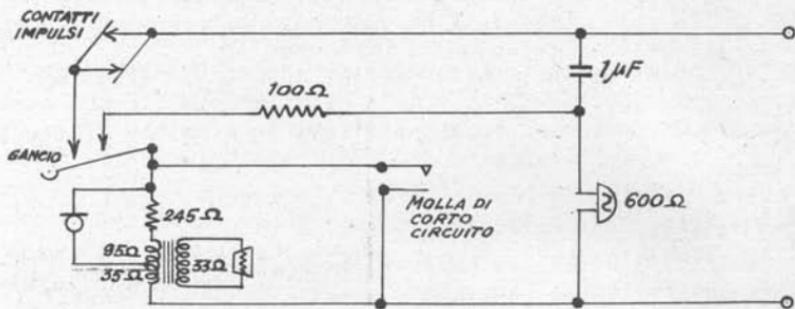


fig.94

pulso di chiusura consecutivi.

Vengono qui citati alcuni dettagli costruttivi del sistema SIEMENS che è il più diffuso in Italia.

La chiamata di un utente si compie come è noto a micro-telefono staccato facendo rotare ogni volta il disco sino all'arresto che limita il movimento; il disco viene poi abbandonato a se stesso e ricondotto dall'azione di una molla nella posizione di riposo, a velocità angolare mantenuta costante, da un regolatore centrifugo a frizione, collegato all'albero rotante del disco.

All'atto della carica del disco, che rappresenta la prima delle due fasi, viene provocata la rotazione dell'asse mediano solidale con il disco forato cosicché venga messa in tensione una robusta molla antagonista destinata ad accumulare l'energia necessaria per la fase di ritorno. La ruota elicoidale infilata folle sull'asse non ne segue la rotazione (fig.95).

Non appena il disco forato viene lasciato libero, iniziandosi la fase di ritorno, la tensione della molla produ-

ce la rotazione in senso inverso a quello di carica dell'asse mediana del rocchetto ad esso solidale. Questa volta un apposito nottolino costringe la ruota elicoidale a seguire la rotazione dell'asse in maniera che il movimen-

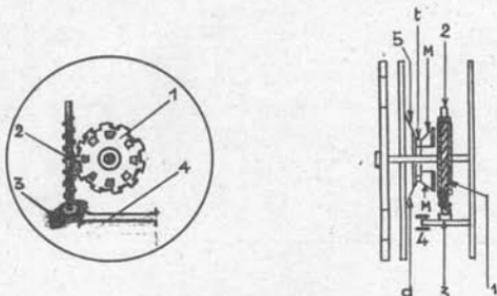


fig.95

- 1) ruota elicoidale, 2) albero elicoidale del freno
- 3) settore d'impulsi, 4) molle del contatto d'impulsi, 5) freno.

to venga trasmesso all'albero elicoidale su cui è calata una specie di camma di fibra, il vettore d'impulsi, fig. 96.

Grazie ad un opportuno rapporto di trasmissione, il settore d'impulsi compie un numero di giri esattamente corrispondente alla cifra formata durante la carica del disco, aprendo ad ogni giro le molle del contatto d'impulsi così da interrompere altrettante volte il circuito che collega il disco al selettore che ne deve venir azionato.

La velocità di rotazione dell'albero elicoidale, e quindi del settore d'impulsi viene opportunamente mantenuta costante mediante (fig.95) un apposito freno a forza centrifuga ottenuto dalle masse M che allargandosi mandano a sfregare ^{due tasselli} di gomma dura contro al disco fisso d. Normalmente questo freno viene regolato in maniera che la corsa di ritorno del disco, nel caso di carica completa per la formazione della cifra zero, duri circa un secondo, ottenendosi così che ad ogni impulso spetti la durata di circa 1/10 di secondo.

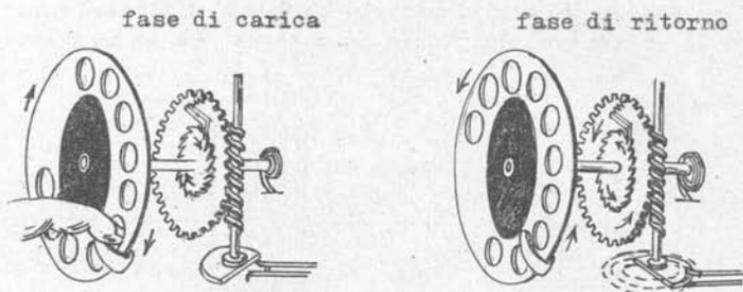


fig.96

Assegnando inoltre un angolo opportuno al settore di impulsi, si riesce a determinare un rapporto rigorosamente costante tra apertura e chiusura delle molle del contatto d'impulsi. Normalmente questo rapporto viene fissato in 1,6:1 ripartendo cioè la durata dell'intero impulso, stabilita come abbiamo visto in circa $1/10$ di secondo, in modo da assegnare rispettivamente 40 e 60 millisecondi all'apertura ed alla chiusura del circuito d'impulsi.

Durante l'invio degli impulsi un secondo gruppo di contatti a molla (molle di corto circuito), pure portato dal disco combinatore e normalmente aperto, viene mantenuto in posizione di chiusura allo scopo di porre in corto circuito gli organi della trasmissione e della ricezione, evitando così di introdurre nel circuito degli impulsi la resistenza addizionale del microfono, e sopprimendo gli sgradevoli rumori che produrrebbero nel telefono le interruzioni di corrente.

Il selettore nella centrale viene comandato a distanza da parte dell'utente mediante gli impulsi da esso inviati dal disco combinatore (fig.97).

Nell'esempio considerato in figura 97 l'utente chiamante compone il numero 35, formando successivamente col disco

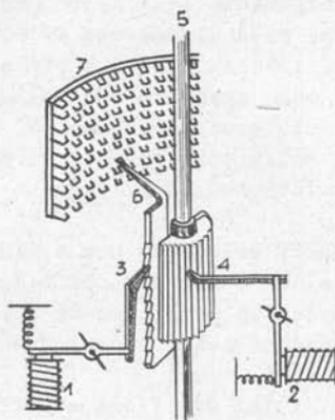


fig.97

- 1) Magnete di sollevamento, 2) Magnete di rotazione,
- 3) Nottolino di sollevamento, 4) Nottolino di rotazione,
- 5) Asse mediano, 6) Braccetto di contatto,
- 7) Banco di contatto.

combinatore, le cifre 3 e 5.

Alla formazione della prima cifra, il 3, il disco combinatorio invia al selettore, per il tramite dei circuiti del complesso di comando ad esso relativo, 3 impulsi di corrente continua, che attraversando l'avvolgimento del magnete di sollevamento 1 fanno sì che questo attiri tre volte la propria ancorotta ed i braccetti di contatto fissi sull'equipaggio mobile vengono con ciò innalzati fino alla terza decade.

La formazione della seconda cifra, il 5, completa il processo di selezione, portando i braccetti a coincidere proprio con l'attacco richiesto.

La seconda serie d'impulsi, non giunge più, questa volta, all'avvolgimento del magnete di sollevamento: ma durante la pausa che l'utente interpone necessariamente tra la formazione di due cifre successive, i circuiti del complesso di comando del selettore avviano i nuovi cinque impulsi

in arrivo all'avvolgimento dell'altro magnete del meccanismo di azionamento, cioè il magnete di rotazione.

Il magnete di rotazione aziona cinque volte il nottolino di rotazione che, agendo a sua volta, sull'apposito cilindro dentato dell'equipaggio mobile, fa ruotare i braccetti, già pronti sulla terza decade di sollevamento, dei cinque passi di rotazione che li portano sull'attacco desiderato.

Ma il compito di selettore non è finito. Dovendo sostituire l'operatrice dei centralini di smistamento manuale, il selettore ed il relativo complesso di comando debbono assumersi pure la direzione delle successive fasi della comunicazione.

Sono i circuiti del selettore ad effettuare la prova sull'utente desiderato, l'invio della corrente di chiamata la giunzione definitiva alla linea ove questa sia libera, la trasmissione dei vari segnali necessari al buon svolgimento del traffico telefonico.

Infine, terminata la comunicazione, al riappendere del ricevitore da parte degli utenti, il selettore deve praticare il disinnesto del collegamento stabilito. A questo scopo viene inviata al selettore dai circuiti della centrale, attraverso quelli del complesso di comando, una serie di impulsi che provoca la rotazione dell'equipaggio mobile e dei suoi braccetti fin oltre l'ultimo passo della decade ch'esso aveva occupata; l'equipaggio mobile cade a fondo per peso proprio e libera i braccetti dal banco di contatto sì che una robusta molla lo può far rapidamente ruotare a ritroso fino al punto di partenza.

Nelle centrali automatiche Siemens vengono adottati due sistemi essenzialmente diversi di preselezione caratterizzanti i due grandi sistemi fondamentali di centrali: sistema a preselettori e sistema a cercatori di chiamata.

Nel sistema a preselettori ogni utente possiede in centrale un proprio selettore a rotazione, il preselettore, al cui banco di contatto vengono collegati i selettori a sollevamento e rotazione adibiti ai collegamenti.

La disposizione degli organi di selezione d'una piccola centrale a preselettori per un massimo di cento utenti è rappresentata nella fig. 98.

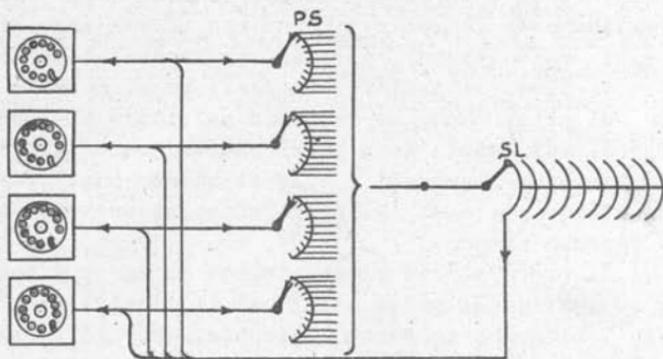


fig.98

Ciascun apparecchio è allacciato mediante una linea a due conduttori ai circuiti dell'equipaggio mobile del proprio selettore, situato nella centrale ad esclusiva disposizione dell'apparecchio stesso. Ai vari attacchi del banco di contatto del preselettore sono ordinatamente collegati, mediante i cablaggi della centrale, i selettori a sollevamento e rotazione, chiamati selettori di linea, per il compito che è loro affidato di bloccare, in ottemperanza ai comandi loro trasmessi dagli utenti, le linee degli apparecchi richiesti, onde stabilire i collegamenti desiderati: così ad esempio al passo uno del preselettore faranno capo i conduttori del primo selettore di linea, al passo due quelli del secondo e così via.

I vari circuiti sono disposti in maniera che non appena un utente che intende stabilire una comunicazione solleva il microtelefono dalla forcilla venga messo in moto automaticamente ed immediatamente il preselettore ad esso relativo; il preselettore così avviato ruota strisciando i propri braccetti sulle lamelle di contatto alle quali sono collegati i selettori di linea.

E' questa la fase essenziale della preselezione: il preselettore è infatti inserito in modo da arrestare automaticamente la sua rotazione non appena esso giunga con i suoi braccetti sull'attacco corrispondente ad un selettore di linea libero; il preselettore si fermerà ad esempio sul primo passo se il primo selettore di linea sarà a riposo, sul quinto se i primi quattro selettori di linea risulteranno impegnati e solo il quinto sarà riconosciuto per libero all'atto della prova che il preselettore compie su ciascun attacco.

Il preselettore blocca infine in maniera completamente automatica il primo selettore di linea libero, preparandolo a ricevere le serie di impulsi che gli verranno inviati dall'utente con le manovre del disco combinatore, tutto predisponendo cioè per la fase immediatamente successiva della comunicazione, quella della selezione propriamente detta.

Tutto l'andamento ora descritto avviene assai rapidamente, in un tempo che, anche nel caso più sfavorevole che il preselettore debba ruotare di dieci passi prima di trovare un selettore libero, non supera quello di 0,325 secondi: essendosi calcolato, in base a numerose esperienze, che il tempo che l'utente interpone necessariamente tra il sollevamento del microtelefono e la formazione del numero si aggira da 0,6 a 0,7 secondi, risulta come la preselezione eseguita secondo il sopradetto sistema non possa assolutamente venir avvertita dall'utente che intende stabilire una comunicazione.

Fondamentalmente diversi da quelli ora descritti sono la disposizione ed i concetti che informano la preselezione secondo il sistema a cercatori di chiamata.

Anche il cercatore di chiamata, come il preselettore, è rappresentato da un selettore a rotazione; ma in questo caso il selettore adibito a cercatore, solitamente di maggior capacità di quello impiegato come preselettore, non costituisce più un organo singolo per ciascun apparecchio ma viene invece stabilmente connesso con i selettori addetti al collegamento.

Nella figura 99 è schematizzata la disposizione d'una piccola centrale secondo il sistema a cercatori di chiama-

ta, per un massimo di cento utenti.

Ad un gruppo di apparecchi, il cui numero è limitato dalla capacità del selettore a rotazione usato come cercatore, vengono assegnati tanti cercatori quante sono le comunicazioni contemporanee che debbono venir consentite al gruppo stesso (nella illustrazione s'è rappresentato, per maggior semplicità, un unico cercatore a trenta passi ed un unico selettore di linea).

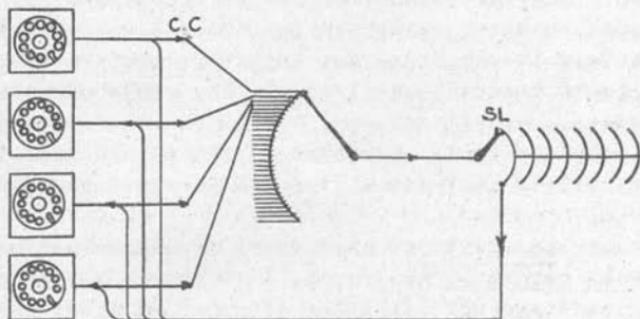


fig.99

Principio del sistema a cercatori di chiamata.

Le linee a due conduttori di ciascun apparecchio d'un dato gruppo fanno capo, in centrale, agli attacchi del banco di contatto del cercatore di chiamata.

In tal modo il primo apparecchio sarà allacciato al primo passo d'un cercatore e quindi, per essere tutti i passi omonimi dei cercatori d'un determinato gruppo multiplati fra loro, a tutti i primi passi dei cercatori del gruppo cui

appartiene; il secondo apparecchio sarà allacciato al secondo passo dei cercatori; e così via fino al trentesimo apparecchio.

I braccetti dell'equipaggio mobile dei cercatori sono invece connessi costantemente con i selettori seguenti.

Non appena un utente d'un dato gruppo che intenda stabilire una comunicazione solleva il microtelefono dalla forcella, i circuiti della centrale provvedano a mettere immediatamente in moto un cercatore di chiamata non impegnato precedentemente; il cercatore entra in rotazione strisciando così i suoi braccetti sulle lamelle del suo banco di contatto in cerca dell'attacco dell'apparecchio di cui è stato sollevato il microfono. Anche qui appositi circuiti di prova soccorrono il selettore in tale ricerca, provvedendo ad arrestare la rotazione del cercatore proprio appena esso ha raggiunto l'attacco dell'utente che vuole effettuare una chiamata e stabilendo così quella connessione tra utente e selettore di linea che è necessaria per lo svolgimento della fase di comunicazione immediatamente successiva, la selezione.

Ai preselettori o ai cercatori di chiamata fanno seguito i primi selettori di gruppo, a 10 numeri per la prima cifra formata; i secondi selettori di gruppo a dieci numeri per la seconda cifra formata, ecc., e gli ultimi a 100 numeri per la penultima ed ultima cifra formata (fig.97). Con preselettori opportunamente disposti e calcolati in base al massimo numero probabile di conversazioni contemporanee della zona, si può realizzare un notevole risparmio nel numero delle linee che collegano gli utenti di una determinata zona alla centrale.

La telefonia automatica deve il suo sviluppo alla precisione ed uniformità di lavorazione; più che frutto di genialità è senz'altro da considerarsi come un frutto dell'organizzazione di produzione.

Incidentalmente si può ricordare che questa necessità di elevatissima precisione su apparecchi di grandi serie ha costituito, e costituisce tutt'oggi, un problema tecnologico poderoso tale da far sì che solo 4 o 5 sono in tutto il mondo i complessi industriali in grado di costruire apparecchi telefonici automatici, sia di abonato (cioè a

disco combinatore) sia di centrale (organi di selezione). Queste aziende di ampiezza internazionale, sono la Siemens tedesca, la Ericson svedese, la Standard e l'Autelco americano, le quali hanno smistato le loro fabbriche in tutti i paesi del mondo. La Standard è anche consociata al poderoso gruppo Bell che esercisce circa la metà dei telefoni del mondo.

§ 6) - Moderni sistemi di telefonia.-

Da alcuni anni sono andati diffondendosi altri sistemi di telefonia a grande distanza per utilizzare meglio le linee telefoniche.

In un primo tempo infatti comunicando solo a frequenza vocale e su lunghi tratti ci si preoccupava che la velocità di trasmissione fosse costante alle varie frequenze componenti lo spettro della voce, e che la attenuazione fosse uguale per tutte le frequenze, dando luogo alla "compensazione" delle costanti della linea $L_1 G_1 = R_1 C_1$, in modo da realizzare le condizioni suddette.

Ciò resta ancora valido per i lunghi cavi sottomarini, ma per le linee terrestri, queste condizioni non sono più essenziali potendo inserire dovunque amplificatori corredati da correttori tali da compensare da diversità di attenuazione della linea al variare della frequenza. Infatti ogni 30 e 40 Km. di cavo terrestre è disposto un amplificatore che aumenta il "livello" del segnale telefonico che si era attenuato nel tratto di linea precedente, e compensa la eventuale distorsione introdotta.

Con questo sistema è possibile fare una trasmissione nella gamma fonica 300 e 3000 Hz, ed una su frequenze maggiori, 3500 - 6500 Hz, ottenute per battimento tra quelle vocali ed una frequenza di oscillazione fisso. Un filtro separa queste due trasmissioni.

Procedendo secondo lo stesso orientamento, oggi si può

trasmettere su cavo completamente spupinizzato, ma con amplificatori-correttori più ravvicinati, molte conversazioni contemporanee (circa 12) ognuna occupante un canale dello spettro di frequenza trasmesso. Le gamme di frequenza di ogni trasmissione sono definite dal battimento o dalla modulazione con le frequenze vocali delle frequenze di oscillatori fissi; ad esempio la trasmissione della gamma di componenti vocali 300 - 3000 Hz può essere "trasportata" tra 50.300 - 53.000 Hz, trasmettendo la sola banda laterale superiore della modulazione da parte delle componenti lo spettro della voce di un oscillatore a 50.000 Hz.

Filtri ad induttanza-capacità molto selettivi al fine di evitare diafonia (cioè l'audizione di conversazione estranea) permettono di separare in arrivo le varie trasmissioni, e organi demodulatori trasportano, o con termine telefonico "traspongono" le gamme di frequenza non audibili a quelle modulatrici originarie.

Un ulteriore sviluppo si ha con l'uso del cavo coassiale, il quale avendo una bassa attenuazione può essere usato fino a frequenze di alcuni megahertz senza costringere a avvicinare inammissibilmente le stazioni amplificatrici, chiamate anche ripetitive.

Con esso si possono trasmettere fino a 600 canali telefonici di 3000 Hz ciascuno, opportunamente distanziati, in modo da facilitarne la selezione.

I vari canali possono essere ad esempio riuniti in gruppi di 12 e questi in supergruppi di 5 (cioè 60 canali) così da trasferire con semplice eterodinazione in una zona qualunque di tutta la gamma di frequenza trasmessa, la gamma di un gruppo e di un supergruppo di canali.

Questa suddivisione semplifica ed uniformizza la costruzione dei filtri, che in generale sono a cristallo, e ne riduce il già ingente numero.

Altri sistemi di comunicazione telefoniche sono i pentti radio, generalmente fondati su altri sistemi di modulazione che non siano la modulazione di ampiezza (semplice e doppia modulazione di frequenza, modulazione di larghezza di frequenza o di fase di impulsi, modulazione a codice, ecc) alle scope di trarre vantaggio dalle larghe bande di frequenza disponibili per aumentare il rapporto segnale-distur

bo e renderlo indipendente dai parassiti esterni, con conseguente miglioramento della chiarezza di comunicazione.

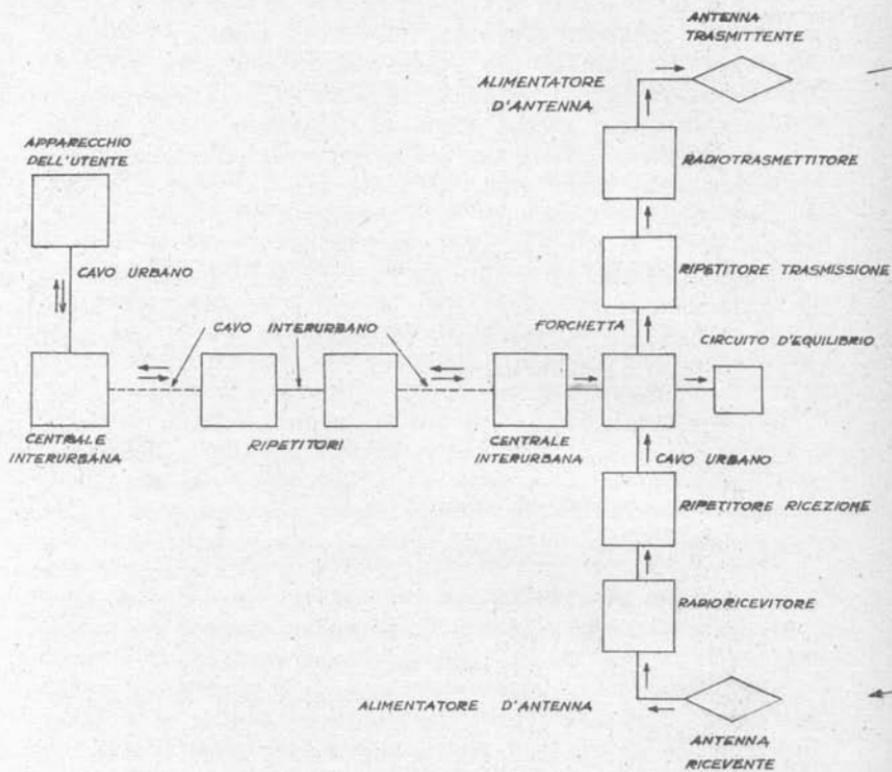
Le comunicazioni telegrafiche, se fatte con treni di impulsi a frequenza elevata (telegrafia armonica) possono essere effettuate con gli stessi organi usati in telefonia. Una trasmissione telegrafica normale od in telescrivente, necessitando solo di una banda di frequenza assai stretta (160 ± 180 Hz), occupa una gamma molto minore di una comunicazione telefonica e quindi in un canale telefonico se ne possono inserire da 15 a 18 telegrafici. Aumenta però naturalmente la complicazione dei filtri.

Sullo stesso principio della telefonia funzionano molti altri dispositivi similari: il radio comando, la trasmissione di immagini detta anche fac-simile, ecc., sui quali non è il caso di dilungarsi.

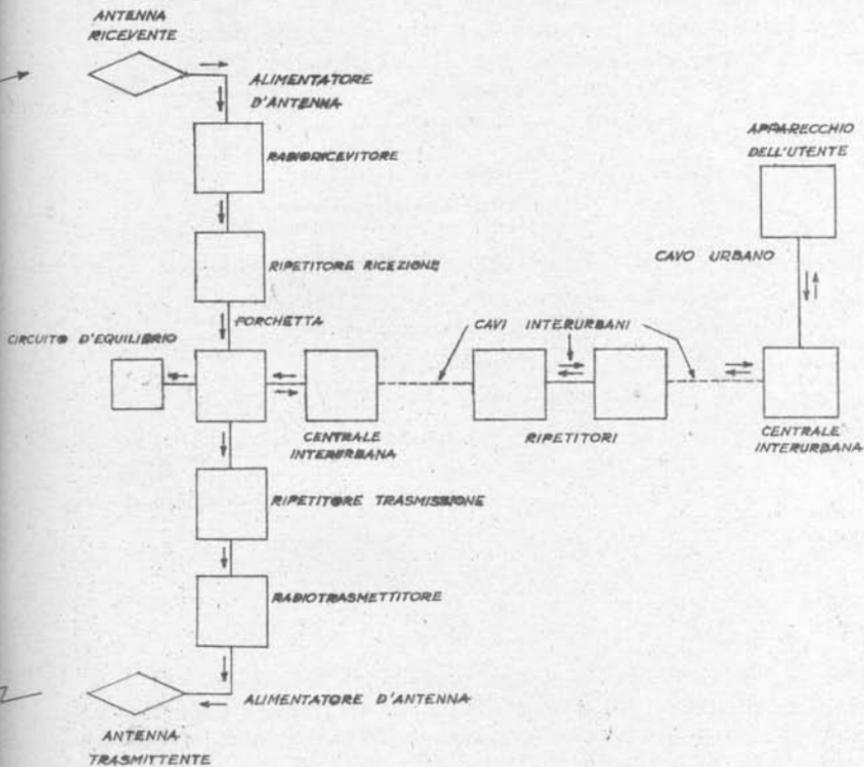
§7) - Cenni sui collegamenti radiotelegrafici.-

L'organo caratteristico del collegamento fra un apparato microtelefonico (a due fili) ed un apparato radiotrasmittente (a quattro fili: due per la trasmissione e due per la ricezione) è il circuito delle bobine ibride, o forchetta. Questo circuito composto di 8 (o 6) bobine è indicato in figura 101. Con esso il segnale a frequenza fonica, proveniente dal ricevitore, risulta applicato al posto microtelefonico locale ma non va a modulare la portante del trasmettitore, mentre quest'ultima è solo modulata dalle frequenze foniche generate dal microfono del posto microtelefonico locale.

Le correnti indicate con le frecce continue aa che circolano negli avvolgimenti collegati al radioricevitore, inducono nelle bobine connesse al radiotrasmettitore tensioni in opposizione di fase, che tra di loro si compensano; mentre le correnti aa inducono nelle bobine dell'apparato telefonico tensioni che fra loro si sommano e quindi vengono percepite dal telefono. Per contro le correnti



SCHEMA DI COLLEGAMENTO



RADIOTELEFONICO

provenienti dal microfono, indicate con le frecce tratteggiate bb inducono nelle bobine connesse al radio trasmittitore una tensione che viene amplificata e va a modulare l'alta frequenza portante del trasmettitore. Uno schema di apparato per comunicazioni radiotelefoniche è indicato in figura 100 e la sua comprensione è immediata. La frequenza

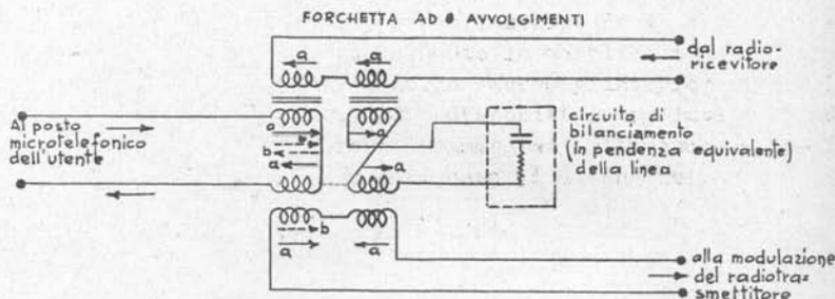


fig.101

della portante per la comunicazione in un senso è diversa dalla frequenza della comunicazione nel senso opposto, entrambe molto stabili e rigorosamente regolamentate da convenzioni internazionali. Le antenne, sia trasmettente che ricevente, devono essere costituite con la maggiore efficienza possibile per quanto riguarda il guadagno e la direttività.

Le installazioni radiotelefoniche a grande distanza sono corredate da numerosi circuiti ausiliari quasi tutti a tubi elettronici; soppressori d'eco, ritardatori, soppressori di reazione, relè ritardati, ecc., tutti allo scopo di aumentare la nitidezza della parola, ridurre i disturbi e riprodurre similmente i treni d'onda sonora.

Il luogo dove si trovano i trasmettitori è topograficamente distinto e generalmente assai lontano da quello ove sono i ricevitori; quest'ultimo è scelto in aperta campagna

in posti ove i parassiti industriali hanno il minimo valore.



Cap. XI

A L T O P A R L A N T I



§1) - Principi generali.-

L'altoparlante ha, come il ricevitore telefonico, lo scopo di trasformare potenza elettrica in acustica. Esso differisce da un ricevitore telefonico sotto due aspetti principali. Mentre questo funziona collegato ad una capsula chiusa o semichiusa che è formata dalla cavità dell'orecchio, l'altoparlante emette onde sonore in un ambiente libero praticamente indefinito; le impedenze acustiche su cui lavorano gli organi mobili sono quindi diverse; inoltre il telefono dà luogo alla richiesta densità di energia sonora in un ambiente di pochi centimetri cubi mentre l'altoparlante deve emettere l'energia sonora in ambienti anche di molte centinaia di metri cubi per mantenersi un livello sonoro minimo assai maggiore di quello dato da un ricevitore telefonico.

Un altoparlante deve essere capace di erogare una potenza acustica assai alta, variabile a seconda delle condizioni in cui deve funzionare, con distorsioni lineare e non lineare il più piccole possibile, sempre minori di quelle ammissibili in un telefono. Il principale ostacolo alla ge
PAOLINI - Acustica ed Elettroacustica.....33

nerazione di alte potenze acustiche sta nella bassissima resistenza acustica specifica dell'aria, che costringe ad avere grandi ampiezze di oscillazione per trasmettere anche piccole potenze.

Secondo il modo di trasformazione dell'energia elettrica in meccanica e quindi in acustica, possono esistere altoparlanti elettrodinamici, elettromagnetici, elettrostatici, piezoelettrici e magnetostrittivi.

La trasformazione elettrodinamica, per l'assenza di distorsione non lineare, a prescindere almeno da fenomeni secondari, come vedremo in seguito, è praticamente quella maggiormente usata.

I requisiti che si richiedono ad un altoparlante sono i seguenti:

- a) - distorsione lineare limitata. Ciò, significa (Cap. II) che, entro un dato intervallo di frequenza il rapporto fra la potenza acustica specifica di uscita, misurata sull'asse dell'altoparlante ad una certa distanza dall'altoparlante stesso e la potenza elettrica di entrata resti compreso entro un determinato intervallo, espresso in decibel.
- b) - il valore medio del rapporto suddetto, che è funzione della frequenza e del rendimento, non sia inferiore ad un certo limite.
Ciò significa che il rendimento acusto-meccanico sia superiore ad un certo limite.
- c) - distorsione non lineare della potenza acustica in uscita non superiore ad un certo valore per la massima potenza elettrica nominale di alimentazione; cioè coefficiente di distorsione non lineare inferiore ad una certa percentuale, alla potenza massima per la quale è calcolato l'altoparlante.

Oltre alle precedenti condizioni elettroacustiche l'altoparlante deve soddisfare a tutte le caratteristiche di robustezza meccanica, di isolamento elettrico, di soprarisaldamento e di resistenza all'uso che sono normalizzate per il macchinario elettromeccanico in genere.

L'organo mobile che trasforma potenza meccanica in ac-

stica è costituito da una membrana di materiale assai rigido la quale non ha in generale forma piana, ma chè, per semplificare il problema, assimiliamo a forma piana, in modo da poter utilizzare i risultati dello studio del pistone vibrante.

Si è visto che la resistenza acustica media su cui lavora un pistone vibrante può essere molto aumentata incapsulando il pistone e collegandolo ad una tromba esponenziale. Se la resistenza acustica media aumenta così notevolmente, può anche raggiungere varie decine di volte, a parità di forza eccitante, quella emessa dallo stesso pistone liberamente vibrante, affacciato ad una parete rigida.

In tali condizioni le differenze fra le resistenze acustiche sotto cui vibrano le varie parte del pistone sono molto elevate e quindi è necessario che il materiale costituente il pistone così incapsulato sia sufficientemente rigido, in modo da non flettere sotto le differenze di carico tra punto e punto. Pur usando materiale assai rigido, e naturalmente anche assai leggero affinché la reattanza meccanica non sia preponderante di fronte alle resistenze, il diametro in pratica non può superare una diecina di centimetri senza che si verificano flessioni del pistone, le quali conducono vibrazioni in opposizione delle varie parti del pistone stesso separate da linee nodali, con conseguente diminuzione di potenza acustica erogata.

Di conseguenza gli altoparlanti a tromba hanno sempre una membrana (pistone) di diametro assai piccolo, mentre le membrane di altoparlanti direttamente vibranti in aria, essendo le differenze di impedenza acustica da punto a punto assai minori, possono raggiungere diametri anche di due o tre decimetri prima che, a parità di frequenza, si verifichino anche in essi gli inconvenienti lamentati per le membrane degli altoparlanti a tromba.

Inoltre il materiale costituente la membrana di altoparlanti vibranti liberante in aria è di cellulosa omogeneizzata ed impregnata per conferire maggiore rigidità, compatibilmente con la sua leggerezza, mentre le membrane incapsulate sono di materiale più rigido, anche se più pesante, di bachelite o di metallo. Tuttavia la differenza fra le impedenze acustiche compensa largamente la differenza

dei diametri e gli altoparlanti a tromba, a parità di dimensioni globali e di distorsioni introdotte erogano una potenza acustica maggiore ed hanno un rendimento assai maggiore di quello degli altoparlanti a membrana liberamente vibrante in aria.

Assimilata la membrana liberamente vibrante o la sezione della bocca della tromba ad un pistone, risultano i fenomeni di direttività di cui è stato detto in precedenza. Cioè all'aumentare della frequenza, od anche, in altre parole, al crescere del rapporto tra diametro del pistone e lunghezza d'onda, la potenza acustica ha tendenza a concentrarsi in un lobo sempre più stretto secondo l'asse della membrana stessa, e quindi varia la distribuzione del campo sonoro con la direzione. Per contro però la concentrazione verso l'asse della potenza, generalmente migliora la risposta sull'asse della membrana che altrimenti, per le ragioni che vedremo appresso, tenderebbe a diminuire col crescere della frequenza.

§ 2) - Altoparlante elettrodinamico a cono.

L'organo motore di un altoparlante elettrodinamico è costituito da una bobinetta circolare immersa in un campo magnetico radiale generato da un magnete permanente od elettromagnete (fig. 102). Questa bobina, quando percorsa da una corrente a frequenza acustica, e sollecitata da una forza alternativa secondo il suo asse, trascina se nel suo moto una superficie tronco-conica di materiale assai rigido e leggero la quale trasmette il suono al mezzo circostante. Per approssimazione si suppone ancora assimilabile come è già fatto la superficie vibrante (cono con copertura di 50° e 70°) a quella del pistone trattato nel capitolo I°. Il diametro del cono non può superare 20 e 30 cm. perchè altrimenti il cono stesso, di cellulosa omogeneizzata, non avrebbe sufficiente rigidità. Quando D/λ non supera l'unità e cioè per frequenze minori di c/D , che tuttavia sono entro la gam-

ma della voce e della musica, l'impedenza offerta dal mezzo alla vibrazione della membrana tronco-conica, per quanto è stato visto nel capitolo I°, si compone di una parte reale X cioè resistiva, circa proporzionale al quadrato della frequenza e di una parte immaginaria Y , cioè reattiva, proporzionale circa alla frequenza. Si deduce che per mantenere circa costante la potenza $\frac{1}{2} X$, erogata nell'intervallo di frequenza suddetto a parità di corrente nella bobina mobile e quindi di forza eccitatrice F , occorre che la velocità $v' = F/Z_m$ vari inversamente alla frequenza. Per ottenere ciò è necessario che l'impedenza meccanica totale (Cap.II):

$$Z_m = \sqrt{a^2 + \left(\omega m - \frac{h}{\omega}\right)^2},$$

dovuta agli organi mobili ed alla reazione del mezzo $X+jY$, sia prevalentemente costituita dalla massa m , cioè la frequenza di risonanza principale del circuito meccanico sia

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{h}{m}},$$

inferiore alla frequenza della gamma da riprodurre. Gli altoparlanti a cono hanno infatti la frequenza di risonanza principale compresa tra 40 e 120 Hz, cioè intorno al limite inferiore della gamma audibile.

Ad es., ad un altoparlante con un cono avente 25 cm., di diametro, corrisponde la frequenza 1340 Hz per la quale $D/\lambda = 1$; quindi dalla frequenza di risonanza principale, compresa fra 40 e 120 Hz, fino a 1340 Hz, la potenza acustica erogata deve rimanere circa costante.

La componente reattiva dell'impedenza specifica dell'aria si può scrivere, per $D/\lambda \leq 1$:

$$Y = K \frac{D}{\lambda} \quad ;$$

ove K è un coefficiente di proporzionalità ricavata dal diametro di figura 108, od anche:

$$Y = K \frac{D}{c} f = \omega \frac{KD}{2\pi c} \quad ,$$

quindi la presenza del mezzo equivale anche all'aggiunta di una massa costante per unità di superficie della membrana, pari a:

$$\frac{KD}{2\pi c} \quad .$$

Su tutta la membrana dell'altoparlante viene aggiunta la massa di aria covibrante:

$$\frac{KD^3}{8c} \quad .$$

Questa massa d'aria covibrante, proporzionale al cu-

bo del diametro, può superare, per diametri di membrana as sai elevati, ad es., maggiori di 20 centimetri, la stessa massa della bobina mobile e del cono, proporzionale al qua drato del diametro.

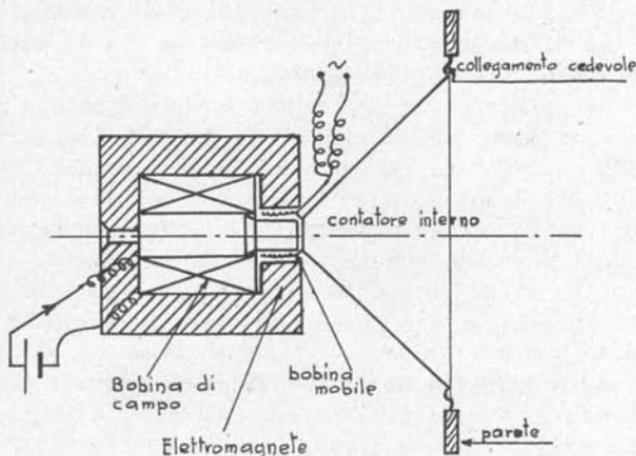


fig.102

La somma di queste due masse interviene nella determinazione della frequenza di risonanza principale della membrana.

A parità di corrente nella bobina mobile, realizzata così l'erogazione circa costante di potenza acustica fino alla frequenza $f = c/D$, si trova che tale potenza diminuisce per frequenze crescenti oltre tale limite. Infatti la velocità ξ continua a diminuire con legge circa inversamente proporzionale alla frequenza, e la parte resistiva della impedenza dell'aria, non cresce più col quadrato della frequenza, bensì resta circa costante.

Tuttavia, considerando la potenza specifica emessa sull'asse dell'altoparlante, l'inconveniente suddetto è in parte compensato da una sempre maggiore concentrazione della potenza sonora secondo l'asse all'aumentare della frequenza. Per contro, a crescere della frequenza tendono a formarsi configurazioni di linee nodali sulla superficie del cono che separano zone che vibrano in opposizione di fase. Ciò tende pure ad abbassare la potenza acustica erogata, perchè il suono emesso dalle zone del cono vibranti con una certa fase si compone in opposizione con quello emesso dalle zone vibranti con fase opposta.

Nei riguardi della potenza acustica totale erogata è più vantaggioso che alcune parti del cono non vibrino affatto anzichè vibrino in opposizione di fase alle precedenti. Ciò si ottiene favorendo la generazione di discontinuità nella vibrazione della superficie del cono per mezzo di corrugazioni concentriche della superficie stessa, attraverso le quali mal si trasmette il movimento generato dalla forza applicata al cerchio ove è attaccata la bobina mobile, (fig. 103).-

All'aumentare della frequenza si arresta man mano il moto degli anelli più esterni del cono, e ciò equivale d'altra parte ad una diminuzione della sua massa utile, con conseguente aumento della velocità.

Questo fenomeno compensa perciò la diminuzione di superficie vibrante emettendo il suono. Aumentando ancora la frequenza oltre 3000 - 4000 Hz la massa della bobina diviene però generalmente preponderante rispetto a quella della superficie, ridotta ad anelli sempre più interni. Per ridurre questo inconveniente si può usare per il conduttore della bobinetta, alluminio invece di rame ed eliminare del tutto il supporto della bobina laccando semplicemente l'avvolgimento per conferirgli la necessaria indeformabilità. Con una costruzione accurata si ottengono altoparlanti a cono che hanno una risposta fedele fino a 5000 + 8000 Hz entro quattro o cinque decibel, ma in generale oltre 3500 + 4000 Hz la risposta di un altoparlante comincia decisamente a cadere.

Un modo usato per aumentare la risposta del sistema riproduttore sonoro alle alte frequenze (superiori ai 3500 Hz

circa), consiste nell'adoperare assieme all'altoparlante a cono, anche un piccolo altoparlante ausiliario a tromba, il quale, sia per la proprietà della tromba di emettere solo i suoni con frequenze superiori ad un certo limite, sia perchè può venire inserito in circuito insieme all'altoparlante per le basse frequenze, in modo da avere una separazione elettrica delle alte dalle basse frequenze acustiche, (fig. 104) funziona solo per le frequenze superiori al limite prefisso.

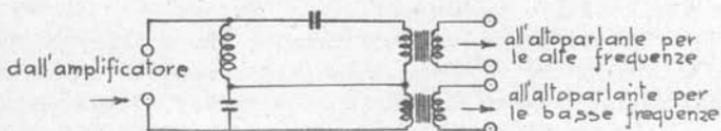


fig.104

Anche alle basse frequenze acustiche la risposta dell'altoparlante in generale cala, perchè vi è interferenza (legge di Hughes per i fronti d'onda) tra il suono emesso dal lato del cono e quello, in opposizione di fase, emesso dal lato opposto. Questo inconveniente viene ovviato disponendo l'altoparlante affacciato ad una parete assai estesa (baffle) separatrice delle onde sonore emesse da un lato da quelle emesse dall'altro, oppure incapsulando accuratamente con materiale assorbente acustico la parte posteriore dell'altoparlante (baffle infinito). Per frequenza intorno alla risonanza ed al di sotto di essa si può migliorare la risposta, che altrimenti cadrebbe in modo assai brusco, utilizzando il suono emesso dall'altoparlante posteriormente. Questo si ottiene con vari dispositivi: basso reflex, labirinto, ecc., sui quali non è qui il caso di diffondersi, riflettendo il suono emesso posteriormente di nuovo verso la parte anteriore con una inversione di fa-

se.

La forza che agisce sulla bobina anulare è:

$$F = m B l I$$

ove n è il numero di spire, l la lunghezza di una spira, I la corrente che circola e B l'induzione (supposta uniforme, il che di solito non è) quindi proporzionale a B^2 . Si vede da qui la necessità di avere induzioni assai alte nel traferro (almeno 08 e 09 Wb/m²) per ottenere un buon rendimento della trasformazione di potenza.

L'induzione B può ottenersi o con un elettromagnete (in molti radioricettori tale elettromagnete è utilizzato anche da induttanza di filtro di livello), o con un magnete permanente ad alta induzione residua (del tipo delle leghe alluminio - nichel - cobalto) ad alta potenza magnetica. Attualmente l'ALNICO V è il materiale più adatto per la fabbricazione di corti blocchetti magnetizzanti, da porre in serie al resto del circuito magnetico di cui fa parte anche il traferro ove può muoversi la bobina. Tali blocchetti, preventivamente magnetizzati, con il loro magnetismo residuo, generano una f.e.m. che da luogo ad un certo flusso totale e quindi alla induzione nel traferro. Affinchè l'energia disponibile nel traferro sia la massima possibile, è conveniente che la riluttanza del circuito magnetico sia tale da far lavorare il materiale del magnete nel punto della curva di isteresi in cui è massimo il prodotto HB . (fig. 105).

Il centratore della bobina mobile è una struttura flessibile nel senso assiale del cono e rigida in tutte le direzioni normali all'asse dello stesso, collegata da un lato alla bobina mobile e dall'altro a qualche parte ferma e massiccia del circuito magnetico, in guisa da permettere il moto della bobina anche in trasferri molto piccoli dell'ordine di grandezza del decimo di mm. da ogni lato della bobinetta) senza che, per decentramenti casuali come ad es. deformazioni termiche, la bobina vada a sfregare sulle pareti del traferro.

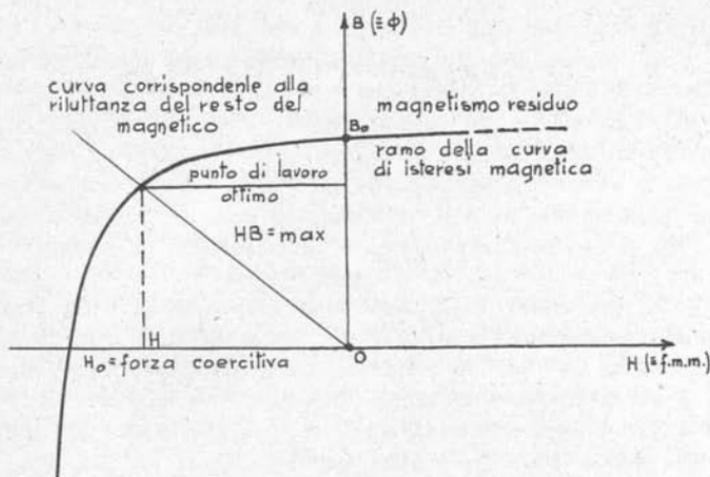


fig.105

Il centratore può essere interno alla bobine, fissato al pernotto centrale del circuito magnetico. od esterno al giogo del circuito magnetico stesso.

Quando si ha il circuito magnetico permanente, si preferisce il centratore esterno, fatto da un materiale unito, in modo da schermare il traferro da polverino di ferro che venisse attirato. Naturalmente anche le altre entrate dalle quali il polverino può andare a depositarsi nel traferro, devono essere chiuse (fig.105) anteriormente da un tappo di feltro e posteriormente da un anello di metallo non magnetico.

I centratori possono essere di bachelite, se intagliati a zampe di ragno oppure di tela bachelizzata ondulata se continui come quello indicato in figura 86. La presenza del centratore è sempre causa di distorsione non lineare, perchè questo funziona anche da limitatore di ampiezza, specialmente per le basse frequenze ove le ampiezze tendono a divenire elevate. La membrana è fatta come già detto, di cellulosa triturrata ed imbastata al fine di ottenere anisotropicità elastica, e lo spessore diminuisce all'aumentare della distanza dal centro in moto da ottenere una buona flessibilità al contorno esterno. Per di più la striscia di fissag

gio al contorno del cestello è ondulata.

La bobina mobile non è immersa in un area anulare ad induzione B costante, per non voler adottare troppo ferro ed una eccessiva f.m.m. bensì l'altezza della bobina supera la zona in cui B è costante, e pari al suo valore massimo. Per questa ragione la forza, entro l'ambito di ogni alternanza, non è esattamente proporzionale alla corrente, ma nasce una distorsione non lineare di entità assai modesta.

La membrana può talvolta vibrare sotto l'azione di una forza sinusoidale con una frequenza metà di quella della forza eccitante. Questo fenomeno si spiega nel modo seguente: ogni striscia del materiale costituisce il cono è di forma rettilinea e viene eccitata con una forza che ha una componente secondo la generatrice (fig. 106). La striscia di materiale del cono si comporta quindi come un solido caricato di punta. Ad una alternanza di compressione la striscia flette in B all'alternanza seguente di tensione la striscia ritorna in posizione di riposo A , alla seguente alternanza di compressione flette in C ed alla seguente ancora si stende in A , alla successiva torna in B e così via. Tutto il cono, per effetto della componente suddetta della forza, vibra quindi con una frequenza metà di quella della forza stessa.

Questo fenomeno, che si manifesta per ogni frequenza quando la forza eccitatrice supera un certo limite, prende il nome di suono "rauce". Per ridurlo, o eliminarlo del tutto, si dà alla membrana una forma incurvata in modo da dissimmetrizzare gli organi secondo le generatrici (Nawinmembrana) (fig. 107), oppure si dà alla membrana una forma a sezione non circolare, ad esempio ellittica, in modo da diversificare quanto avviene lungo le varie generatrici. In fig. 107 è tracciata la sezione di un cono a nawinmembrana.

Talvolta la membrana non si fa né piana né conica bensì a forma di cupola che rende più difficile il formarsi linee nodali che hanno così forte tendenza a prodursi per le frequen



fig. 106

ze alte.

Dal punto di vista elettrico la bobina mobile dell'altoparlante elettrodinamica, a cono libero od a tromba, si comporta come circuito equivalente di fig. 109. La resistenza R è l'induttanza L sono quelle proprie dello avvolgimento della bobinetta, mentre il circuito $R'C'L'$ è fittizio, e tiene conto della risonanza principale della membrana, che dando luogo ad un massimo di ampiezza di vibrazione induce nella bobinetta un massimo di f.c.e.m. - A parità di d.d.p.v. applicata alla bobinetta la corrente i che circola ha un minimo per il massimo di f.c.e.m. generata allo stesso modo come se si avesse un massimo d'impedenza della bobinetta. In figura 109 è indicato il modulo di

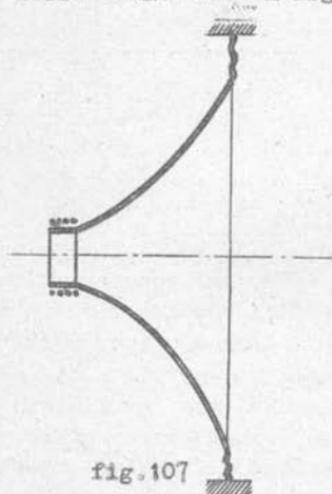


fig. 107

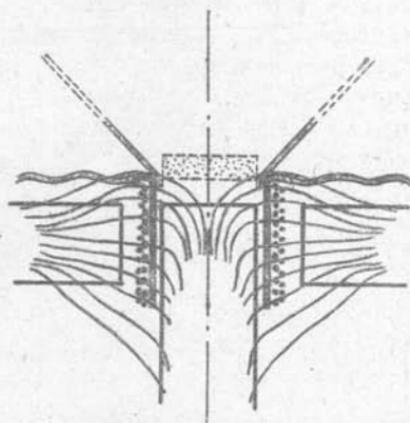


fig. 108

impedenza $|Z|$ offerta dalla bobinetta alle varie frequenze. Il massimo di impedenza $|Z_0|$ si ha quando si produce la risonanza principale dello altoparlante.

Questo andamento dell'impedenza equivalente dello altoparlante non tiene alcun conto delle risonanze secondarie e di tutti gli altri fenomeni dei quali si è accennato.

Negli usuali altoparlanti a cono o da membrana vibrante liberamente, il rendimento acustico-elettrico a frequenze superiori a quella della risonanza principale si aggira generalmente intorno a valori molto bassi, al disotto del

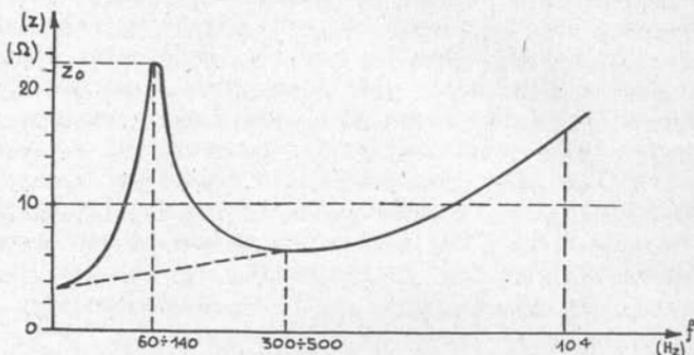


fig.109

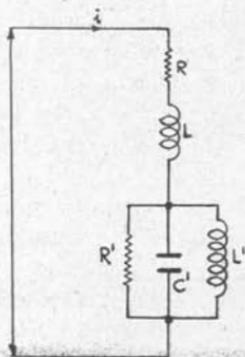


fig.110

3 % ma con campi magnetici molto intensi, in alcune zone della gamma centrale di frequenza il rendimento può aumentare fino a qualche unità per cento; per altoparlante a tromba il rendimento può salire per fino a 20 - 30 per %.

Per radiare forti potenze acustiche è indispensabile l'uso di una tromba. Essa infatti, migliorando il rendimento, permette di usare potenze elettriche non eccessive; per contro l'altoparlante a tromba è più costoso ed ha una maggiore distorsione ritmica lineare e non lineare per le risonanze delle strutture meccaniche costituenti la tromba e per la variazione della impedenza di

radiazione dovuta al fatto che la tromba non è infinita. Le sue dimensioni aumentano all'aumentare della potenza; per ridurre lo spazio occupato dalla tromba si usa spesso inflettere la sua parte più stretta o costruirla a volte rientranti, come già indicato nel capitolo I. L'impiego della tromba per alte potenze, migliorando il rendimento, ha per conseguenza di diminuire le perdite nella bobina mobile e quindi il suo riscaldamento. Nei grandi altoparlanti la considerazione della temperatura ha molta importanza poiché non si può far lavorare la bobina oltre 50° e 60° poiché altrimenti il supporto, anche se metallico e perciò incombustibile, darebbe luogo a deformazioni e decentramenti particolarmente pericolosi quando, per raggiungere un alto rendimento, si riduca al traferro al minimo valore possibile.

§3) - Altoparlanti magnetostatici ed elettrostatici.

Il tipo più semplice di altoparlante magnetostatico corrisponde ad un comune ricevitore telefonico. Questo tipo è ora meno usato di un tempo perché porta con sé due difetti principali. La superficie vibrante è soggetta ad una forza costante anche in assenza di oscillazioni, e si ha una forte distorsione non lineare funzione dell'ampiezza della fondamentale.

Gli altoparlanti magnetostatici, hanno avuto un grandissimo impiego prima della diffusione dell'altoparlante elettrodinamico; ancora oggi vengono usati al posto di quest'ultimo tutte le volte che si debba avere un altoparlante meno costoso. Sono da preferirsi ai tipi elettrodinamici od agli altri, quando si voglia realizzare un apparecchio stagnò; in essi è molto più facile assicurare una buona tenuta. In pratica vengono anche chiamati "elettromagnetici".

Nell'interno della risonanza il rendimento complessivo è maggiore di quello di un altoparlante elettrodinamico e, per non rinunciare a questo vantaggio, si pone di solito, analogamente a quanto si fa nel telefono, la risonanza nel centro delle frequenze udibili. Sempre allo scopo di aumentare il rendimento, gli altoparlanti magnetostatici sono

sono sempre usati in connessioni a tromba.

Un altoparlante elettrostatico è costituito (fig.110) da una membrana di area, S posta esattamente in mezzo a due controelettrodi, e fra essa e questi è applicata una tensione continua E ed una alternata di ampiezza e . La membrana è così sottoposta ad una forza

$$F = \frac{S}{4 \pi d^2} \left[Ee + \frac{\xi}{d} (E^2 + e^2) \right] ;$$

in cui d è la distanza della membrana nella posizione di riposo dai controelettrodi, e $\xi \ll d$ è la deviazione che subisce la membrana stessa dalla sua posizione di riposo.

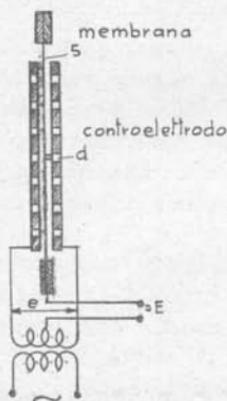


fig.111

Tra i principali inconvenienti vi è in primo luogo la distorsione non lineare che introducono e che può essere ridotta facendo d grande rispetto a ξ . Perciò si viene a diminuire grandemente la risposta. La sensibilità può essere un po' migliorata aumentando fino al massimo consentito dalla rigidità dell'aria cioè qualche migliaio di volt. Ciò oltre ad essere poco pratico, varia la sensibilità solo

proporzionalmente ad E. Poichè la membrana può essere fatta leggera, e non si ha formazione di linee nodali gli altoparlanti di questo tipo funzionano con buon rendimento alle alte frequenze (oltre 3000 + 4000 Hz), ma non sono in pratica adoperabili all'infuori del laboratorio a causa della delicatezza della membrana, le difficoltà d'isolamento, la preoccupazione che desta una così alta tensione continua.

Tentativi di costruzione di altoparlanti piezoelettrici e magnetostriktivivi, non sono andati oltre qualche prova di laboratorio.

oooo
ooo
o

Cap. XII

SEGNALAZIONE SUBACQUEA

—oO—

§1) - Generalità.

La comunicazione subacquea per mezzo di segnali acustici è l'unico sistema di collegamento fra sommergibili immersi a profondità oltre 5 e 10 metri e tra questi e le altre unità.

Il vantaggio principale della trasmissione subacquea consiste nella facilità con la quale le unità possono mettersi in contatto e scambiarsi una conversazione; per contro la segretezza è molto aleatoria perchè una trasmissione acustica subacquea, anche se non può essere capita, serve senza dubbio a rivelare ad altre navi, munite di idrofoni o ascoltatori subacquei di qualsiasi genere, la presenza della unità che trasmette.

La scelta della frequenza di trasmissione è legata a molte considerazioni. L'udito ha la massima sensibilità tra 2000 e 3000 Hz e la sensibilità cala notevolmente quando la frequenza diminuisce. Aumentando la frequenza diminuisce la distanza a cui debbono essere posti i segnalatori per realizzare un determinato grado di direttività e quindi diminuisce l'ingombro dell'apparecchiatura. Però

non si può aumentare di troppo tale frequenza perchè con essa aumentano le perdite magnetiche (isteresi e correnti parassite) qualora si tratti, come quasi sempre avviene, di apparecchi magnetostatici, e diminuisce il rendimento. Le frequenze da usarsi, se scelte in base a criteri puramente tecnici, dovrebbe risultare da un compromesso tra queste contrastanti esigenze.

In un primo tempo fu usato la frequenza di 600 Hz, come l'apparecchio "Fessenden", ora completamente in disuso, poi a 1050 Hz che tutt'ora serve all'estero per il naviglio commerciale, ed infine ora nella nostra Marina Militare i segnalatori a 3000 Hz. Le altre Marine usano frequenze di poco diverse.

In generale si ha interesse ad eseguire comunicazioni in direzioni contenute nel piano orizzontale o poco inclinate rispetto ad esso, di conseguenza l'adozione di un sistema direttivo nel piano verticale ed adirettivo in quello orizzontale è utilissima. Se gli elementi trasmettitori ricevitori, di dimensioni piccole rispetto alla lunghezza d'onda in acqua del suono emesso, sono disposti su una verticale a distanza pari ad una semilunghezza d'onda, l'emissione è massima secondo le direzioni del piano orizzontale, è nulla secondo la loro congiungente verticale.

Un moderno elemento trasmettitore subacqueo di tipo normale, a doppia membrana vibrante, quando è immerso in acqua viene alimentato con una potenza elettrica compresa tra 100 e 150 W, e deve esservi applicata la sua tensione di esercizio che di solito è circa 300 Volt. Tipi speciali possono essere previsti per tensioni e potenze diverse.

La potenza elettrica totale P_t consumata per l'eccitazione di un elemento, si ripartisce in potenza perduta P_p nelle perdite elettriche e magnetiche, in potenza P_m consumata nelle vibrazioni meccaniche per la presenza dell'attrito interno del materiale dell'organo mobile che costituisce l'elemento, od in potenza acustica P_a comunicata al mezzo circostante. Il rendimento meccanico-elettrico

$$\eta_m = \frac{P_m + P_a}{P_t} ,$$

può essere facilmente determinato con una misura di potenza in funzione della frequenza (fig.112). Le ordinate relative alla parte tratteggiata danno le perdite P_p mentre i tratti di ordinate relative alla risonanza danno la potenza consumata nelle vibrazioni meccaniche e acustiche insieme $P_m + P_a$.

Per un elemento trasmettitore subacqueo moderno il rendimento η_m può raggiungere anche il 60 + 65 o/o. Il decremento δ_1 della curva di risonanza in acqua così determinata è proporzionale alle perdite $P_m + P_a$ mentre il decremento δ_2 che si ottiene rilevando la curva di risonanza del trasmettitore vibrante in aria (ammettendo che in aria P_a sia così piccola di fronte a P_m da potersi praticamente trascurare), è proporzionale a P_m (fig.113).

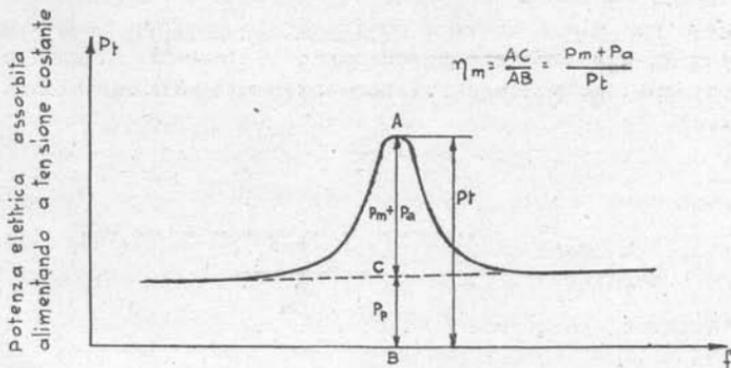


fig.112

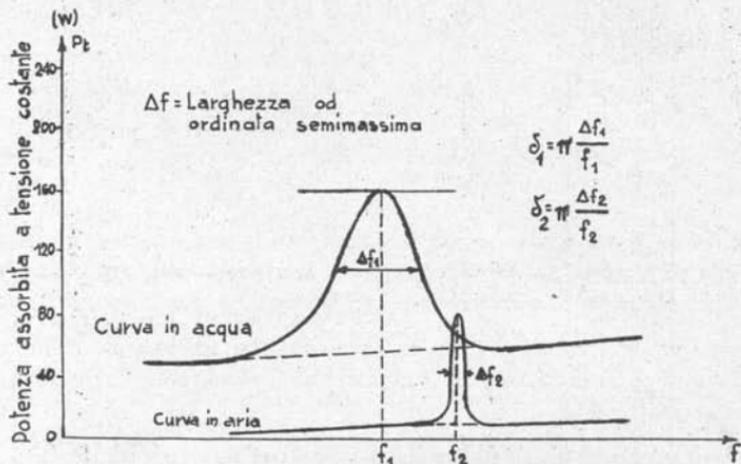


fig.113

I decrementi δ_1 δ_2 si rilevano graficamente dalla curva della potenza assorbita in funzione della frequenza, misurando la larghezza a metà altezza della curva di risonanza. Per avere le perdite meccaniche P_m misurando la potenza assorbita con elemento vibrante in aria, uguali a quelle che si hanno con elemento vibrante in acqua, occorre eseguire le due prove a parità d'elongazione dell'organo mobile. Ciò si ottiene eccitando l'elemento in aria con una potenza elettrica corrispondentemente minore. Allora si ha:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{P_m + P_a}{P_m},$$

da cui:

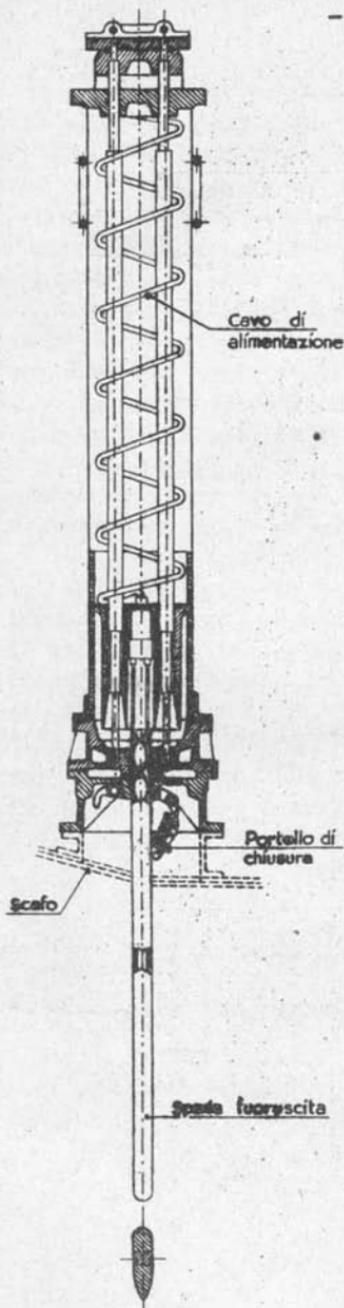


fig. 114

$$\frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1} = \frac{P_a}{P_m + P_a} \cdot (90)$$

Indicando con η_a il rendimento acustico-elettrico dell'elemento si ha:

$$\eta_a = \frac{P_a}{P_t} = \eta_m \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1}$$

Per un trasmettitore subacqueo recente il rendimento acustico-elettrico, cioè il rendimento totale, può raggiungere il 30 e 40 o/o. Gli stessi elementi per la segnalazione subacquea che funzionano da generatori di suono servono anche reversibilmente come ricevitori di suono, per la legge di reciprocità valevole per i quadripoli lineari passivi.

§ 2) - Segnalatori subacquei.

I segnalatori subacquei a 1050 Hz, che sono in esercizio sul naviglio commerciale, sono del tipo elettromagnetico; uno dei due avvolgimenti è percorso

da corrente continua, l'altro da corrente alternata avente una frequenza di 1050 Hz. Un blocco di materiale magnetico laminato è rigidamente collegato ad una membrana a contatto con l'acqua, e viene sollecitato a muoversi rispetto ad una altra massa, pur'essa di materiale magnetico, con una forza alternativa di 1050 Hz di frequenza. Il collegamento tra le due masse è effettuato da 4 sottili aste che si comportano come elasticità. La risonanza meccanica delle due masse con le elasticità delle aste avviene per la frequenza eccitatrice, e l'ampiezza d'oscillazione è massima per tale frequenza. La potenza elettrica d'eccitazione è normalmente di 400 e 500 W.

I segnalatori a 3000 Hz in uso sul naviglio militare, sono costituiti da una doppia lamina vibrante sotto l'azione delle forze attrattive che si esercitano fra le due parti di un circuito magnetico.

Se si manda una corrente di frequenza 1500 Hz nell'avvolgimento di poche decine di spire indicato in fig. 115, ad ogni semionda della corrente si ha attrazione tra il nucleo A ed il nucleo B, costituiti da materiale magnetico laminato, tenuto assieme da una fusione di materiale isolante.

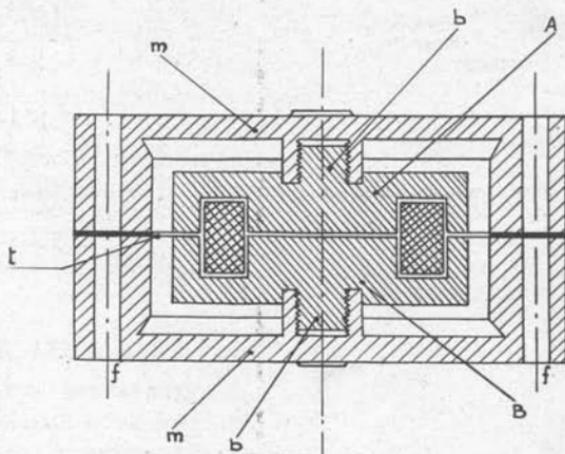


fig.115

Essi sono collegati per mezzo di bulone b stretto a fondo rispettivamente al centro di due membrane m, cosicchè la frequenza della vibrazione meccanica è 3000 Hz. Naturalmente per questa frequenza si fa in modo che si abbiano le risonanze meccaniche delle due membrane m, le quali sono spesse dell'ordine del millimetro od hanno un diametro di una diecina di centimetri.

Per non avere una corrente di eccitazione troppo sfasata rispetta alla tensione, in serie al gruppo di segnalatore è posta una capacità di $0,6 \div 0,8 \mu\text{F}$ la quale, alla frequenza 1500 Hz, compensa la reattanza induttiva dell'avvolgimento del segnalatore. Il materiale costituente la membrana del segnalatore è metallo monel, od acciaio a forte tenore di nichel.

Quando, con buloni messi nei fori f i due semicilindri vengono a stretto contatto, i nuclei A e B nell'interno risultano ancora discosti del traferro t.

È facile che col prolungato funzionamento, al centro delle superfici vibranti si formino delle corrosioni; però esse non devono essere di entità tale da alterare la frequenza di risonanza meccanica dell'elemento o la purezza del tono generato. Comunque al centro delle superfici circolari esiste una zona rinforzata piana di aumento di spessore o di incrudimento del materiale per martellamento.

Non è ammesso che sulle lamine vibranti dei trasmettitori si formino incrostazioni, o vegetazioni, o vengano effettuate pitturazioni di alcun genere, perchè anche un lievissimo strato di materiale avente una resistenza acustica diversa da quella dell'acqua provoca una notevole diminuzione di energia acustica erogata. In figura fuori testo è riportato lo schema elettrico di massima di un impianto di segnalazione subacquea per navi di superficie, con quattro elementi ricetrasmettitori.

§ 3) - Impianto di segnalazione a spada.-

Un impianto di segnalazione subacquea, usato nella no
PAOLINI - Acustica ed Elettroacustica.....36

stra marina militare è costituito da 4 o 6 trasmettitori-ricevitori a doppia membrana disposti verticalmente su un corpo cilindrico a sezione di buona penetrazione (fig. 114). Questo corpo cilindrico, a forma di spada, generalmente è mosso da un motore elettrico e può venire messo fuori dal lo scafo o rientrare in apposita sede entro lo scafo. Di riserva vi è sempre una manovra a mano. Quando la spada è completamente rientrata nella sede predisposta, una saracinesca mossa da un secondo motore elettrico chiude la comunicazione del vano con l'esterno. I trasmettitori ricevitori hanno i centri disposti alla distanza di mezza lunghezza d'onda ($\frac{\lambda}{2} = 25$ cm.) in modo da realizzare una caratteristica direzionale prevalentemente nel piano orizzontale. La corrente a frequenza 1500 Hz viene generata da un gruppo motore alternatore, azionato dalla rete a c.c. di bordo. La manipolazione avviene con relè che interrompe la corrente negli avvolgimenti dei singoli segnalatori. Quando si cessa di segnalare o con un sistema manuale, o con relè ritardato, si commutano i trasmettitori all'entrata di un amplificatore, alla cui uscita è collegata una cuffia, restando così in ascolto dell'altra unità con la quale si sta comunicando. Sulla posizione di ricezione, ai capi dell'alternatore può essere inserito un circuito elettrico equivalente al carico dei trasmettitori in modo che l'alternatore, lavorando su carico costante, non varia la sua velocità e, conseguentemente, la sua frequenza. Negli impianti più recenti, allorchè si passa dalla posizione trasmissione a quella ricezione, si toglie una opportuna resistenza in serie al campo del motore che trascina l'alternatore, variando il campo e quindi diminuendo la velocità del gruppo di quanto occorre per compensare la diminuzione del carico. L'alternatore è del resto munito di un complesso stabilizzatore, e la sua velocità, da cui dipende la frequenza, deve essere accuratamente controllata a mezzo di un frequenziometro a lamine.

Quando i segnalatori sono commutati in ricezione, essi vengono automaticamente polarizzati con una corrente continua che circola nell'avvolgimento. L'impianto di segnalazione è usabile anche con nave in moto oltre 10 miglia; la zona d'ombra di fronte all'apparecchio è di circa una die-

cina di gradi. Le portate sono variabili da 5 a 50 Km.; mediamente 20 Km.; esse ovviamente diminuiscono al crescere della velocità della nave. La portata di segnalazione è minore in estate con acqua calda e stagnante che in inverno e diminuisce al diminuire della profondità del mare.

Quando un sommergibile è posato sul fondo, sarebbe impossibile la comunicazione con la spada; allora si usa un sistema di due trasmettitori-ricevitori a doppia membrana, l'uno sotto l'altro, su una corta asta verticale detta spadino, sistemata in prossimità del ponte di comando del sommergibile. Tutto il complesso trasmettitore e l'amplificatore del ricevitore vengono commutati dalla spada allo spadino e le comunicazioni, per quanto in condizioni assai più infelici che con la spada, possono essere assicurate. Quando l'alternatore alimenta lo spadino in parallelo ad esso è inserito un circuito equivalente al carico dei due (o quattro) elementi mancanti rispetto al caso in cui l'alternatore era collegato alla spada. Per eliminare le vibrazioni che ha la spada quando l'impianto di segnalazione funziona con la nave in moto è in alcuni casi previsto che la spada possa avere oscillazioni spontanee di non più di $\pm 5^{\circ}$ a 6° rispetto ad una posizione media, (spada girevole) in modo che essa, durante il moto vada ad adattarsi spontaneamente all'andamento dei filetti fluidi. L'amplificatore di bassa frequenza al quale vengono collegati gli elementi quando sono usati come ricevitori è a due stadi a trasformatore accordato.

La trasmissione telegrafica è fatta con manipolazione manuale, usando il codice Morse, mentre la ricezione è fatta ad udito.

ooooo
oooo
oo
o

Capitolo XIII

I D R O F O N I A

—oO—

§1) - Generalità e definizioni.-

Col nome di idrofonia si intende lo studio della rivelazione di energia sonora presente nell'acqua. In pratica interessa non solo "scoprire" la presenza di una sorgente sonora od ultrasonora, ma anche individuare la direzione ed il senso secondo cui avviene la propagazione del suono.

Questa operazione di ricerca, che prende il nome di esplorazione idrofonica si effettua con un impianto idrofonico avente spiccate proprietà direttive in virtù della disposizione degli elementi riceventi di suono, detti ricevitori idrofonici o, più semplicemente, idrofon, che lo costituiscono.

La ricerca idrofonica viene limitata, di regola, alle direzioni giacenti nel piano orizzontale. Con i vecchi tipi puramente meccanici di idrofon la determinazione della direzione di provenienza del suono si effettuava ruotando il complesso degli elementi, o variando il cammino che il suono doveva percorrere, entro un condotto, prima di raggiungere gli orecchi dell'operatore. Con i più recenti idrofon elettromeccanici sensibili a largo spettro i quali

sono in sostanza dei microfoni funzionanti in acqua, si tiene fermo il gruppo degli idrofoni stessi e si varia la fase delle f.e.m., o correnti, generate. Per contro, con impianti adatti per ultrasuoni si ruota tutta la base dei ricevitori idrofonici.

I rumori generati dal moto di una nave hanno uno spettro molto complesso che si estende nella gamma sonora e ultrasonora. Una delle cause principali è lo sbattimento delle palette delle eliche nell'acqua, ma non è l'unica, perchè tutto lo scafo vibra, emettendo suoni ed ultrasuoni. La fondamentale della frequenza delle eliche è molto bassa; con 300 giri al minuto la frequenza fondamentale è 5 Hz, e quindi la componente a 1000 Hz è la duecentesima armonica.

La rivelazione della presenza di suoni in acqua è sempre sogettiva, perchè con questo sistema è possibile percepire e distinguere la presenza di un debole suono o rumore utile, in mezzo all'immane e ben spesso preponderante rumore di fondo. La distinzione si ha riconoscendo il timbro ed il ritmo del suono utile, che, nel caso di una nave, è il moto delle eliche con tutto l'apparato di propulsione.

§ 2) - Ricevitori idrofonici.-

I ricevitori idrofonici possono classificarsi come segue:

- a) - ricevitori puramente meccanici ;
 - b) - ricevitori microfonici elettrici.
- a) - I ricevitori puramente meccanici furono i primi ad essere introdotti negli impianti idrofonici. Essi possono essere o semplici ascoltatori a membrana di gomma oppure metallica, ovvero possono essere costituiti da una sferetta cava di gomma sistemata all'estremo di un tubo, di cui l'altro estremo va all'orecchio dell'ascoltatore. I ricevitori meccanici di gomma, rispetto ai simili metallici hanno il vantaggio di essere privi di risonanza accentuata, cioè ri-

producono abbastanza bene tutte le frequenze. Dimensionando opportunamente lo spessore di gomma rispetto al diametro della sfera, si può ottenere una risonanza assai spianata nella gamma 300 - 1500 Hz nella quale sono comprese le componenti dei rumori prodotti dalle eliche che maggiormente sono sentite dall'orecchio. Si ottiene così una vantaggiosa selezione dei rumori utili, dai rumori del mare che hanno per la maggior parte componenti di frequenza più bassa. Per contro i ricevitori di gomma sono maggiormente soggetti ad alterazioni, sono meno sensibili, più instabili e non possono essere sottoposti a calcoli rigorosi.

b) - I ricevitori microfonici, trasformano l'energia acustica in energia elettrica, più adatta per essere trasmessa a distanza con minori perdite e suscettibile di amplificazione e di misura.

I pregi dei ricevitori microfonici sono la maggiore sensibilità e la costanza, quest'ultima raggiunta solo imperfettamente con microfoni a sferette di carbone od anche di metallo opportunamente studiati, ma ottenuta invece in modo soddisfacente con microfoni elettromagnetici ed elettrodinamici, anche se la maggiore costanza di funzionamento è andata un po' a scapito della sensibilità.

Un ricevitore elettrodinamico (fig. 116) si compone di un magnete permanente, od elettromagnete, nel cui traferro è libera di oscillare una bobinetta collegata rigidamente al centro della membrana circolare che chiude una base della custodia, di forma approssimativamente cilindrica, dello idrofona. La risonanza principale del sistema meccanico è a circa 700 e 900 Hz, ma per avere una risposta abbastanza uniforme in funzione della frequenza, l'idrofona contiene sempre uno smorzatore. Attualmente nei tipi più recenti lo smorzamento è realizzato o per via puramente elettrica, a mezzo di grossi anelli di rame, immersi nel campo del magnete e collegati rigidamente alla membrana, nei quali si inducono, durante il moto, delle notevoli correnti parassite frenanti; oppure per via meccanica, a mezzo di trafilazione di olio denso attraverso i fori o fessure.

Il materiale delle membrane degli idrofoni è metallo Monel od altro materiale resistente meccanicamente ed al-

le corrosioni. Il rimanente della carcassa è costituito di bronzo. Le induzioni magnetiche sono dell'ordine di $0,6 - 0,8 \text{ Wb/m}^2$ anche se ottenute con i moderni magneti permanenti (leghe AlNi, AlNiCo, AlNiCu, ecc.) e le spire della bobinetta che è immersa in un traferro il minimo possibile, sono parecchie migliaia (fino a 12.000). Talvolta entro il ricevitore si trova un'amplificazione meccanica dello spostamento della membrane la quale non è rigidamente solidale colla bobinetta ma è collegata a questa per mezzo di leve, realizzando un guadagno di $2 * 3$ volte. I ricevitori da usarsi a notevole profondità (per idrofoni costieri o per sommergibili) devono anche possedere il requisito di non variare inammissibilmente le loro qualità elettroacustiche quando sulla membrana si esercita, oltre la pressione alternativa, anche una forte pressione continua.

§ 3) - Rilevamento idrofonico.-

Il problema dell'esplorazione idrofonica consiste, come è stato detto, nel rilevare soggettivamente la direzione di provenienza di un rumore. Tale operazione può essere fatta con tre sistemi diversi:

- a) - rilevamento biauricolare;
- b) - rilevamento per minimo;
- c) - rilevamento per massimo.

Nell'ascolto diretto esiste una corrispondenza tra la differenza di fase (o di tempo) con la quale l'onda sonora giunge agli orecchi e la direzione dell'onda sonora rispetto all'orientamento della testa dell'osservatore. Il rilevamento idrofonico biauricolare diretto viene appunto effettuato mediante due ricevitori idrofonici collegati ciascuno separatamente ad un'orecchio dell'operatore, il quale ruota il

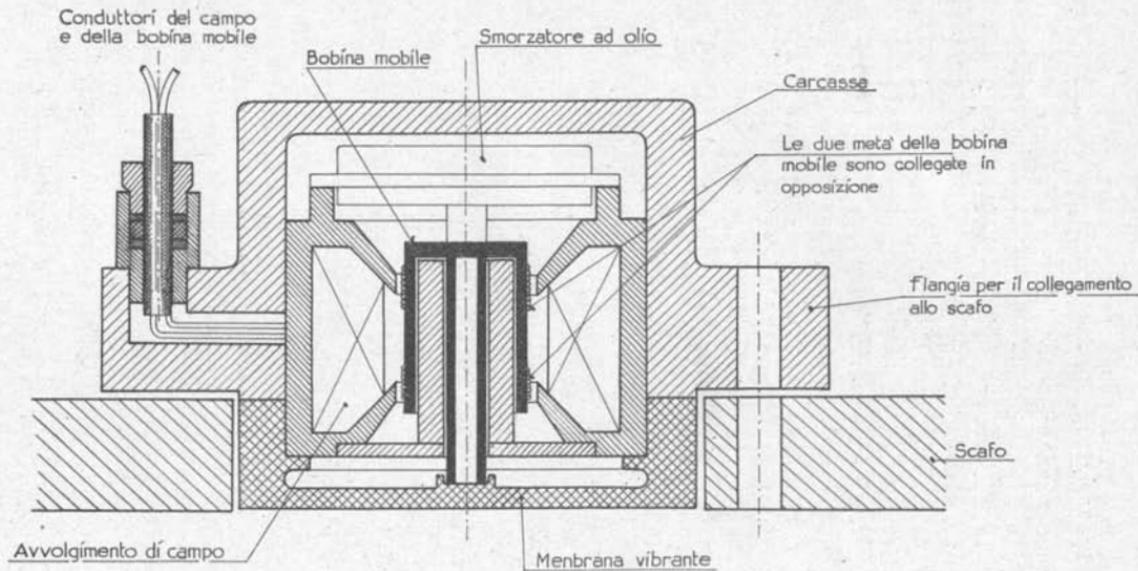


fig. 116

gruppo dei due ricevitori fino a sentire il suono centrato frontalmente. La sensibilità e quindi la precisione di un tale sistema cresce aumentando la distanza fra i due ricevitori. Tale distanza non può superare un certo limite oltre il quale la percezione complessiva non è più quella di una sorgente sonora unica, ma di due sorgenti distinte. Il massimo ritardo dei suoni ai due orecchi che permette ancora la percezione di una sola sorgente è dell'ordine di $1,2 \times 10^{-3}$ sec., che in acqua di mare ove $c \approx 1500$ m/sec corrisponde ad una distanza massima consentita per i ricevitori di circa 1,80 m. Un sistema così semplice è stato realizzato con i tubi C, (fig. 117) costituiti da due sferette di gomma, distanti fra loro metri 1,20 e 1,50 sistemate all'estremità di due tubi metallici di cui gli altri due estremi

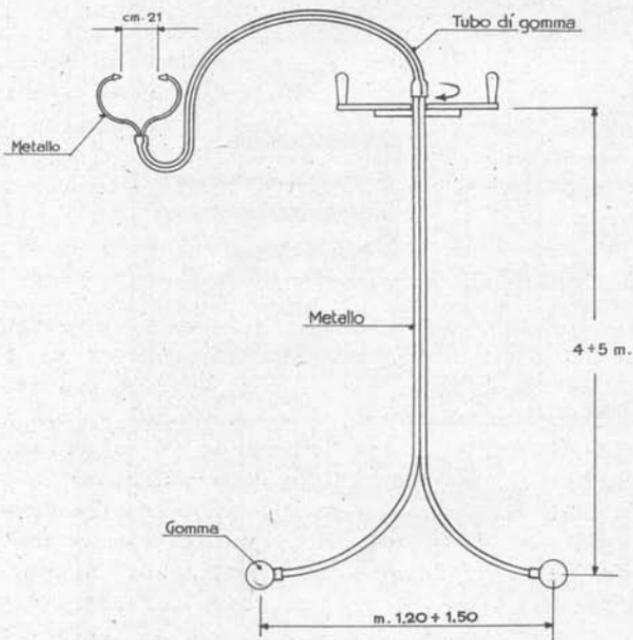


fig. 117

vanno per mezzo di conduttanze in gomma, agli orecchi dell'operatore. Le due sferette vengono immerse in acqua ad una

profondità di circa 2 metri, da apposita gruetta fuoribordo e possono essere ruotate. Una volta definita la direzione di provenienza del suono si ha una ambiguità nel senso, che può essere eliminata, nel caso di sorgente sonora unica notando l'impressione di rotazione della sorgente sonora nel senso logico quando si ruoti il sistema spostandolo dalla posizione di suono centrato frontalmente. E' chiaro che se due ricevitori idrofonici sono in posizione fissa si può ottenere la sensazione di suono centrato frontalmente variando il percorso che il suono deve seguire da uno dei due ricevitori all'orecchio dell'operatore e precisamente aumentando il percorso per il ricevitore investito per primo dal suono. In tali condizioni la direzione di provenienza del suono si può individuare in base all'aumento di percorso che è stato necessario introdurre.

Si arriva così al concetto di compensazione puramente acustica, a cui corrisponde, per i ricevitori microfonicici, quello di compensazione elettrica eseguita sulle correnti che vanno dai ricevitori ai telefoni. Tale compensazione consiste nel cambiare la fase di una delle correnti con un circuito opportuno sino a renderla uguale a quella dell'altra corrente.

b) - Rilevamento per massimo.

Se si mandano i due suoni, ad esempio provenienti dai ricevitori di figura 117, non separatamente ai due orecchi ma "insieme" ad entrambi gli orecchi (cioè si può ottenere, per es., riunendo in un solo i due tubi nel tratto in cui corrono affiancati) si avrà un massimo di intensità sonora i due ricevitori sono investiti in fase dalla onda sonora, cioè quando la loro congiungente è normale alla direzione di propagazione del suono nell'acqua. Invece di ruotare il complesso fino a realizzare tali condizioni, si può anche sfasare uno dei suoni captati rispetto all'altro fino ad ottenere un massimo di intensità ricevuta. Mentre col primo procedimento si utilizza la caratteristica naturale, col secondo si sfrutta la caratteristica artificiale del complesso. Comunque, è possibile in un modo o nell'altro determinare per massimo di intensità di ricezione la direzione di provenienza del suono o rumore.

c) - Rilevamento per minimo.

Se si riuniscono "in opposizione" i suoni provenienti dai due elementi, a compensazione delle fasi effettuate, si ha un minimo di suono risultante; il minimo è zero se non vi sono rumori parassiti e se l'apparechiatura è in tutto esattamente simmetrica (fig. 118).

Teoricamente il sistema per minimo, per la sensibilità logaritmica all'orecchio, è molto più preciso di quello per massimo, ove l'apprezzamento vien fatto in un punto di variazione nulla; tuttavia in pratica, a causa del maschera-

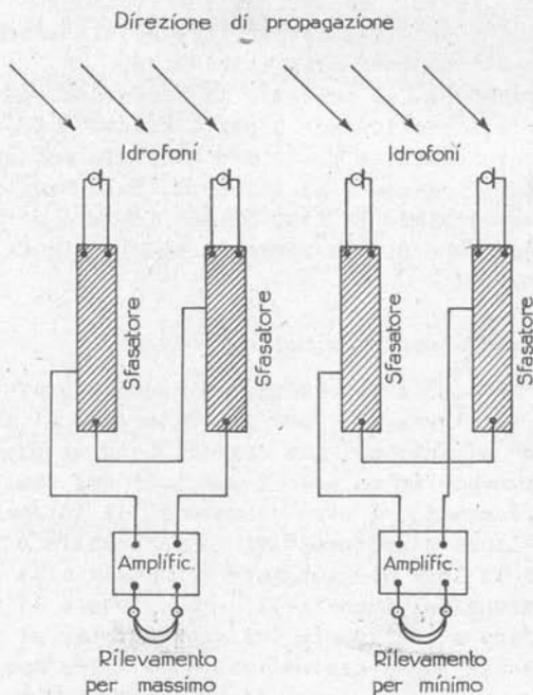


fig. 118

mento acustico operato dai disturbi sempre esistenti, il sistema di rilevamento per minimo di è dimostrato assai meno preciso, ed è stato completamente abbandonato. Paragonando il sistema biauricolare col sistema per massimo nel caso di due soli ricevitori idrofonici a distanza determinata, si potrebbe facilmente dimostrare che il sistema biauricolare consente una maggiore precisione di rilevamento; però il sistema per massimo ha il notevole vantaggio di non essere legato ad alcun limite per la distanza fra i ricevitori, aumentando la quale si migliora notevolmente la precisione del rilevamento. Esso poi acquista tutta la sua importanza quando si impiegano gruppi di ricevitori che formano un complesso con proprietà spiccatamente direttive, perchè così è possibile raggiungere sensibilità e precisione molto maggiori.

Il circuito elettrico rifasatore, o compensatore, adottato su tutti gli apparecchi idrofonici è una catena di cellule a T da π , chiusa sulla sua resistenza, costituisce un filtro passa-basso utilizzato nella gamma di frequenza passante, con frequenza di taglio molto superiore alla massima udibile. Entro la gamma passante, cioè per

$$f \leq f_0 = \frac{1}{\pi \sqrt{LC}}$$

n cellule costituite da pure induttanze e capacità danno un'attenuazione nulla ed uno sfasamento

$$\varphi_1 = 2n \arcsen \left(\frac{1}{2} \sqrt{\omega^2 LC} \right) ;$$

in cui ω è la pulsazione della tensione applicata alla

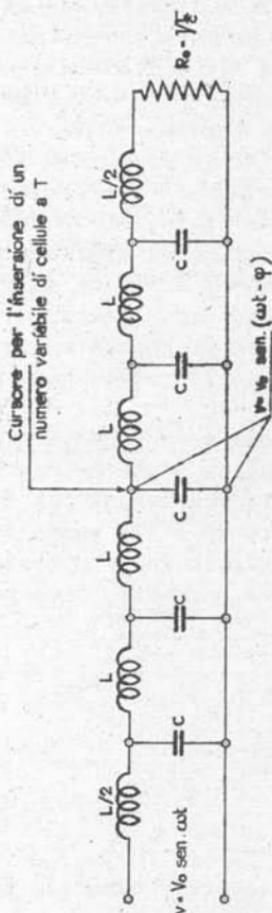


fig.119

delle n cellule di filtro da inserire, affinché φ sia contrario a φ_1 per qualsiasi valore di ω (fig.120) cioè per tutte le frequenze componenti il rumore ricercato. Alla manopola che comanda l'inserzione in circuito delle cellule

entrata, L è la induttanza e C è la capacità degli elementi nella zona centrale della catena; quando la catena del filtro passa-basso (fig.119), sia chiusa sulla resistenza caratteristica $R_0 = \sqrt{L/C}$. L'andamento di questo ritardo di fase φ_1 , prodotto dalle cellule della catena, chiamata perciò anche catena di ritardazione, in funzione della frequenza, ed in un campo di frequenza abbastanza al disotto f_0 di taglio, poco si discosta da quello lineare. Pure lineare è l'andamento dello sfasamento φ delle correnti generate dai due microfoni,

$$\varphi = \frac{\omega d \cos \alpha}{c}$$

La composizione risulta perciò con buona approssimazione indipendente dalla frequenza. A meno di quantità trascurabili, si può in pratica, per ogni valore di φ' , determinare il corrispondente numero

si può collegare un indice scorrevole su un quadrante graduato direttamente in angoli, corrispondenti alla direzione di provenienza del suono.

Il metodo della compensazione elettrica permette una maggiore precisione di rilevamento, e rende molto semplice l'impiego di parecchi ricevitori idrofonici. Altri sistemi di compensazione potrebbero essere pensati, ad es. dei ponti, tutti però non darebbero la stabilità di funzionamento che si ottiene con i filtri passa-basso. Il numero delle cellule di ogni filtro è fissato in modo da avere, col movimento del cursore, una variazione così piccola dello sfa-

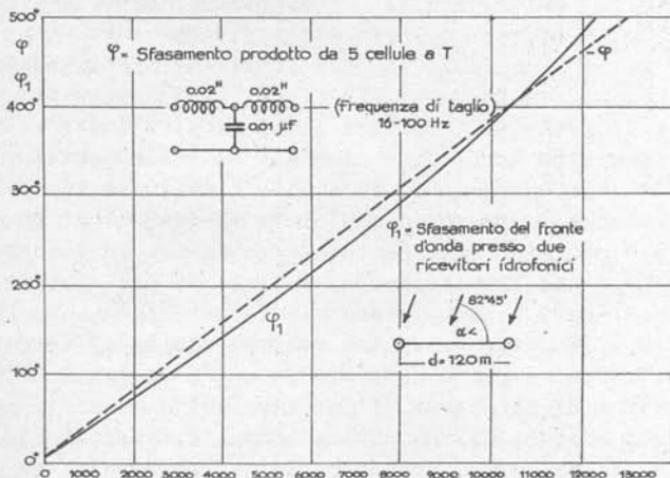


fig. 120

samento che il rilievo soggettivo della variazione grandezza di uscita appaia apprezzabilmente continuo. Ogni cellula corrisponde ad uno sfasamento "di tempo" di qualche mililisecondo, ovviamente costante in tutta la gamma di frequenze da considerata.

§ 4) - Impianti idrofonicici.-

Gli impianti idrofonicici ora in esercizio sono costituiti da un certo numero di idrofoni, collegati per mezzo di trasformatori alla catena di ritardazione (od alle catene di ritardazione), all'uscita della quale ha luogo la compensazione.

L'uscita del compensatore è connessa ad un amplificatore, nel quale è compreso di solito anche un filtro pass-alto per la riduzione dei rumori parassiti provocati dal moto ondoso del mare nei ricevitori idrofonicici, in misura maggiore della riduzione dei rumori utili così da variare il rapporto rumore utile - disturbo e per cambiare la direttività dell'impianto. L'uscita di questo amplificatore è collegata alla cuffia dell'operatore.

Si cita per pure ragioni storiche, l'impianto idrofonicico chiamato "Multispot". In figura 121 è riportato uno schema della metà dell'impianto idrofonicico il quale ha 6 idrofoni per lato della nave disposti su linee rette, formanti fra di loro un angolo di $10 + 15^\circ$. I sei ricevitori, per es. di sinistra, servono ad esplorare la zona a cui si affaccia il lato sinistro della nave e sono divisi in due gruppi di tre ciascuno. Il ricevitore centrale di ogni gruppo è sempre collegato ad una catena che dà uno sfasamento fisso alla f.e.m. in esso generato, corrispondente al tempo necessario al suono per percorrere in acqua la distanza fra i due idrofoni adiacenti. I due idrofoni laterali sono connessi agli estremi di una catena lunga il doppio della precedente, dalla quale, con un contatto scorrevole, si può rilevare una d.d.p. con fase intermedia tra quelle delle due f.e.m. generate dai due idrofoni.

Le uscite delle due catene sono poste in parallelo. Per ogni direzione di provenienza del suono, si ha una posizione del cursore sulla seconda catena per la quale si ottengono fasi uguali delle d.d.p. di uscita delle due catene.

Quindi tra il cursore e la terra, si ha una d.d.p. uguale alla f.e.m. generata da un solo ricevitore idrofonicico, di resistenza interna $1/3$ di quella reale.

Per altre posizioni del cursore, poiché la corrente generata da un elemento si chiude anche attraverso gli altri

Direzione di propagazione

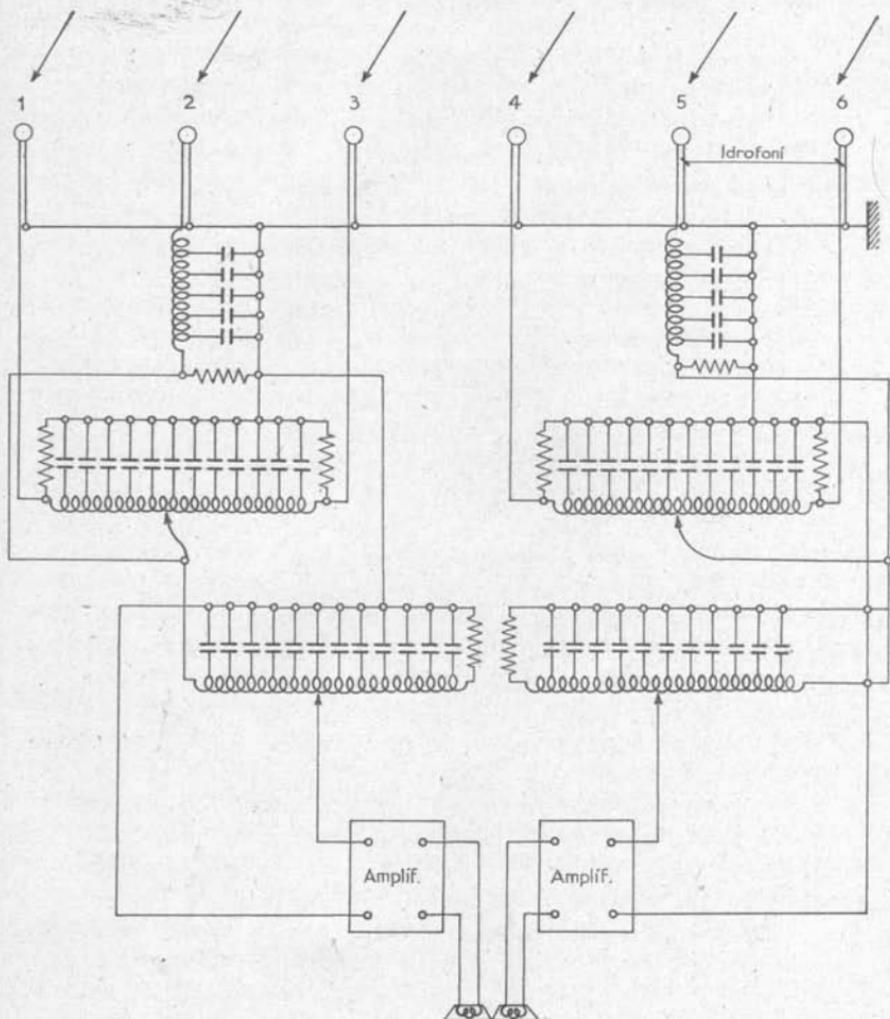


fig. 121

due, per effetto della resistenza interna di essi si ha tra cursore e terra una tensione minore della tensione precedente.

Le tensioni generate dai due gruppi di tre ricevitori idrofonici non sono però in fase tra di loro, ma vengono tuttavia rivasate tra i cursori di uscita di due altre catene di ritardazione lunghe il triplo delle prime (tali da dare uno sfasamento massimo pari al tempo che impiega il suono per andare dal ricevitore 2 al 5, inserite rispettivamente alle uscite dei due gruppi. A compensazione effettuata, le tensioni generate all'uscita di queste catene sono uguali in grandezza e fase. Tali tensioni possono venire applicate separatamente a due amplificatori uguali e questi possono essere collegati ai due padiglioni di una cuffia telefonica. Quando le condizioni suddette siano attuate, l'operatore ha la sensazione del suono centrato davanti a lui (ascoltazioni biauricolare). Se queste tensioni vengono invece applicate in serie ed in fase all'entrata di un amplificatore la cui uscita è collegata ai padiglioni di una cuffia posti in serie, si ha il rilevamento per massimo.

Il sistema "multispot" non è praticamente più usato perché ha due inconvenienti principali. In primo luogo il rilevamento biauricolare è più facilmente mascherabile da disturbi che il sistema per massimo.

In secondo luogo un gruppo di ricevitori allineati da una precisione di rilevamento per massimo non costante per tutte le direzioni.

Questo inconveniente è eliminato quasi completamente, come è stato già detto, adoperando gruppi di ricevitori disposti su basi circolari, e scegliendo opportunamente il diametro della base ed il numero dei ricevitori.

In pratica questa disposizione di impianto, (tipo "Fonoscopio") è attuata disponendo a scafo da 10 a 16, o più ancora, ricevitori su una curva gobba che, però, in proiezione orizzontale è un cerchio od una ellisse. Come nel sistema "Multispot" in ogni ricevitore un estremo è connesso alla terra, l'altro va ad un contatto scorrevole su di un piano collettore formato da lamelle conduttrici, isolate fra loro che fanno capo alle singole cellule di una catena di ritardazione. I contatti provenienti dai ricevitori sono di

sposti in modo che riproducono una configurazione simile a quella della proiezione sul piano orizzontale dei ricevitori. Il sistema di contatti è ruotabile intorno al suo centro per mezzo di un volantino sul piano di lamelle in modo che si possa variare il numero di cellule inserite fra i singoli ricevitori e l'uscita della catena.

La tensione all'uscita della catena, a compensazione effettuata, risulta dall'aver, nella resistenza di chiusura, sommato in fase tutte le correnti dei ricevitori, o correnti proporzionali a queste. Questa tensione opportunamente filtrata ed amplificata può essere ricevuta in cuffia dall'operatore; ed il rilevamento della sorgente sonora viene fatto girando il volantino. Un indice collegato con demoltiplica al volantino, scorre su un quadrante graduato direttamente in angoli del piano azimutale, che sono le direzioni di provenienza del suono. Le resistenze connesse alle le singole cellule della catena (resistenze livellatrici) hanno lo scopo di far sì che la corrente proveniente da ogni ricevitore, la quale attraverso la catena di ritardo si dirama in tutti i ricevitori rimanenti, dia sempre la stessa aliquota che circola nella resistenza caratteristica di chiusura della catena, qualunque sia la posizione del ricevitore sulla catena.

Naturalmente la tensione ai capi di questa resistenza non è uguale a quella generata dal ricevitore, come avviene quando si ha una catena di ritardo per ogni ricevitore; bensì ha ampiezza minore; però il suo valore rimane costante qualunque sia la posizione del ricevitore sulla catena.

In figura 122 è riportato uno schema di principio delle disposizioni planimetrica degli idrofoni a bordo di un sommergibile.

Per separare i rumori utili (rumore di eliche, vibrazioni di scafi ecc.) dai rumori parassiti, i quali hanno le loro componenti con ampiezza massima a frequenza inferiore ai 1000 Hz, è inserito tra gli stadi di amplificazione un filtro passa-alto con frequenza di taglio variabile dall'operatore tra 2 o 3 valori, compresi tra 750 e 1500 Hz. Inserendo tale filtro si ottiene una maggiore direttività della caratteristica artificiale e quindi una maggiore precisione del rilevamento ed in generale un certo miglioramento

Base idrofonica "fonoscopio".

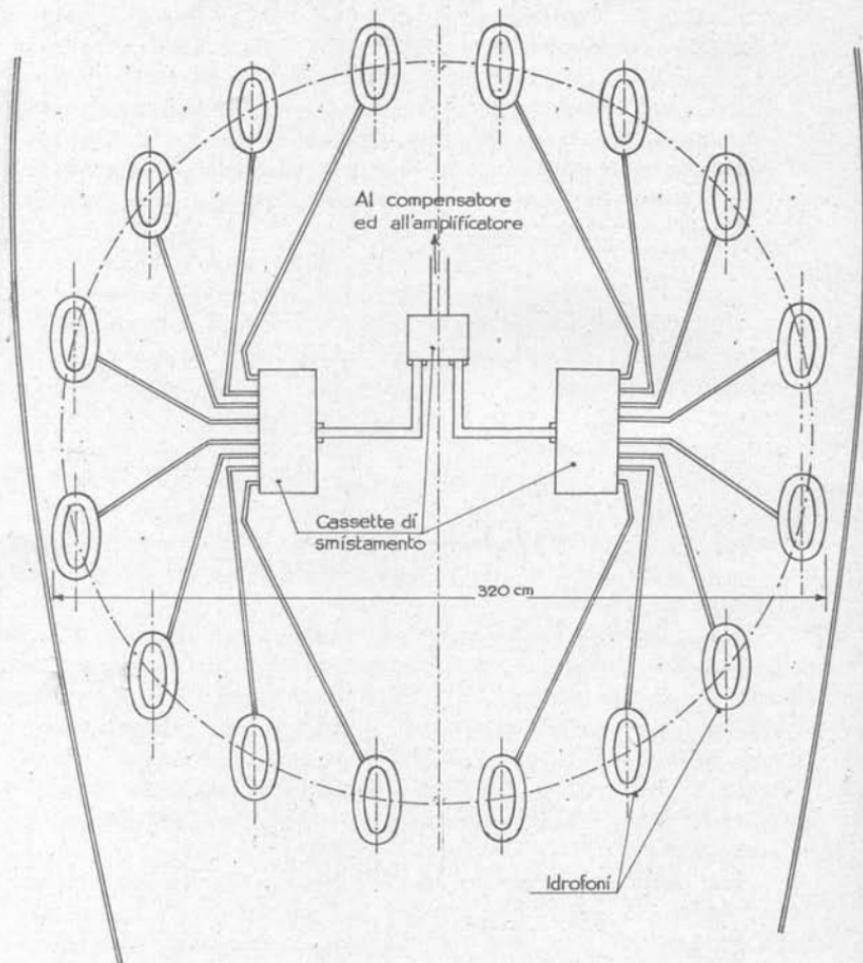


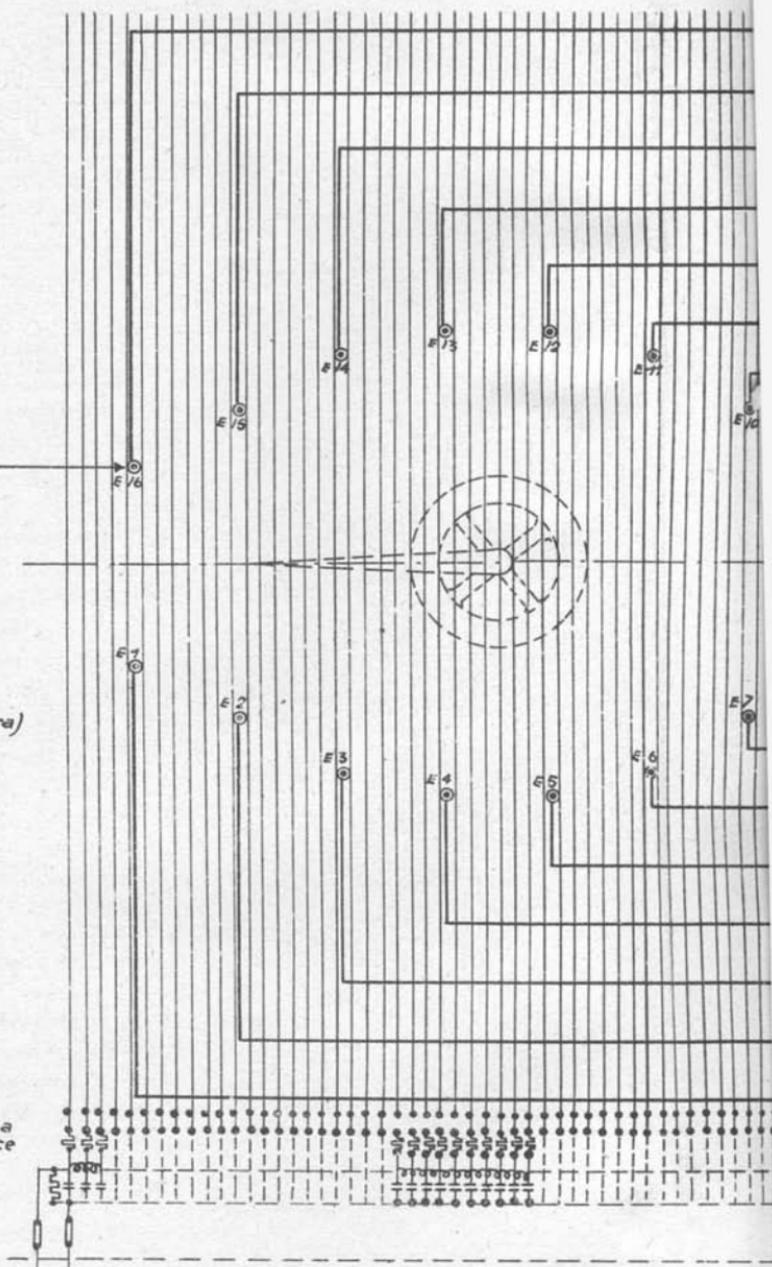
fig. 122

spazzole

piano
rigato
(chitarra)

resistenza
livellatrice

Amplificatore



spezzole

E 16

E 15

E 14

E 13

E 12

E 11

E 10

E 9

pieno
rigato
(chitarra)

E 1

E 2

E 3

E 4

E 5

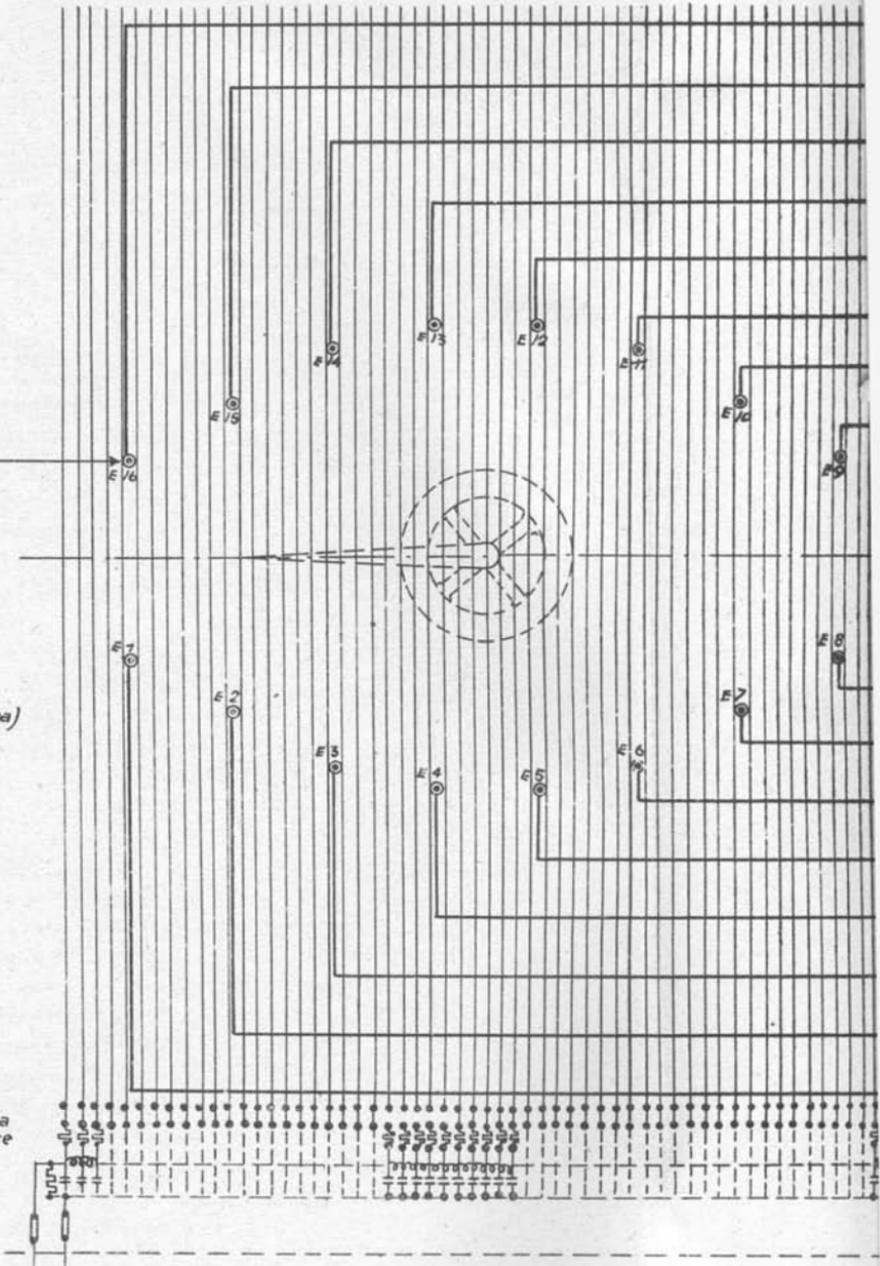
E 6

E 7

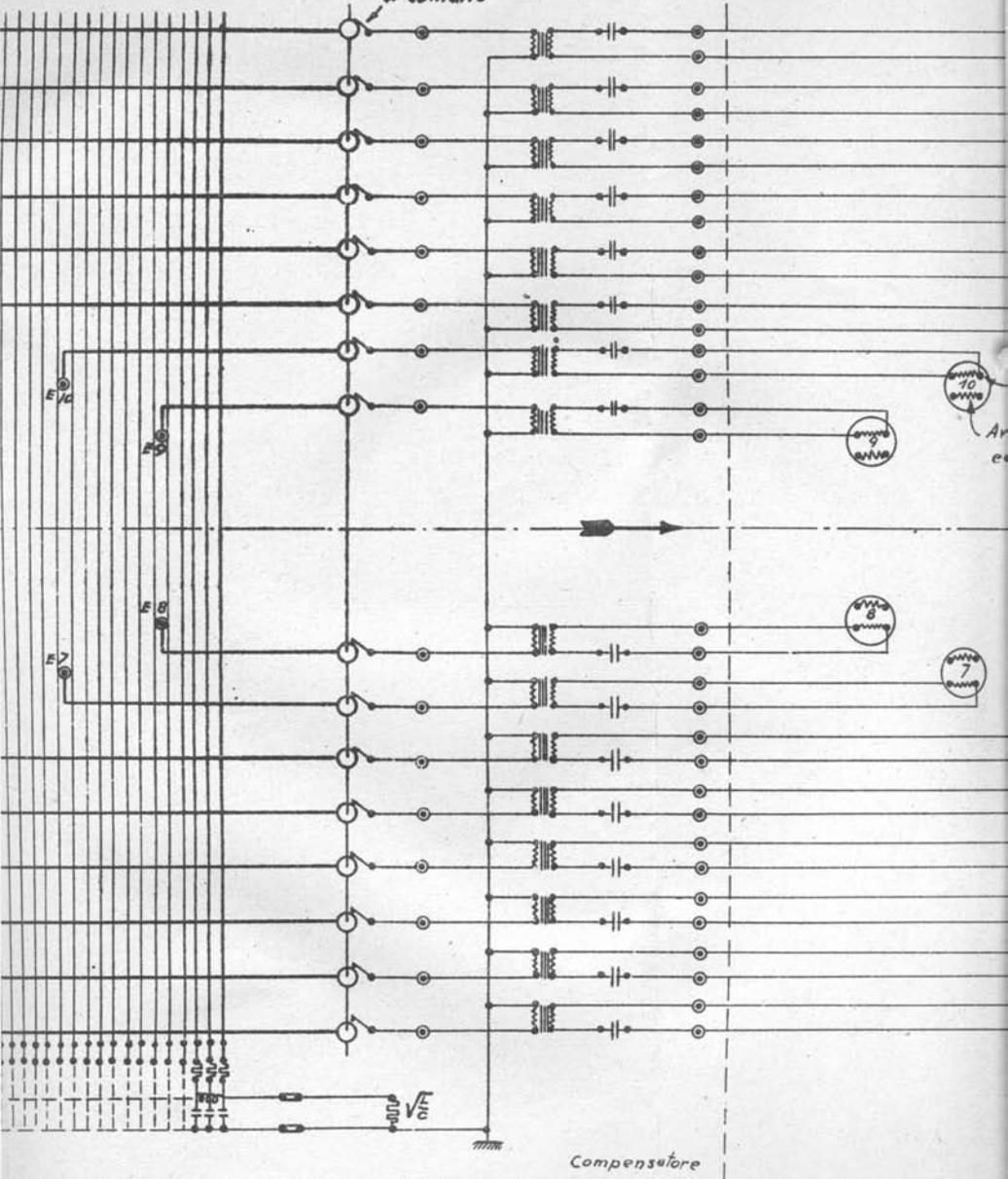
E 8

resistenza
livellatrice

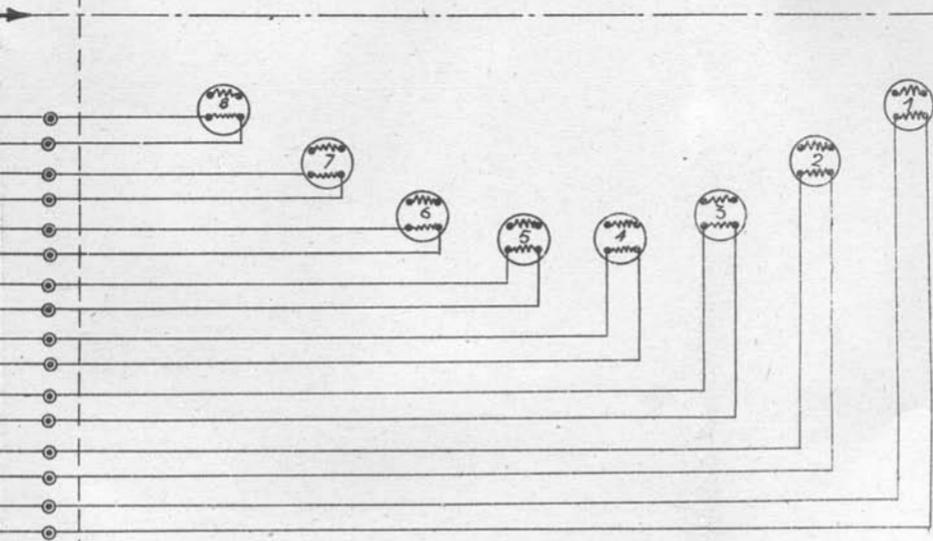
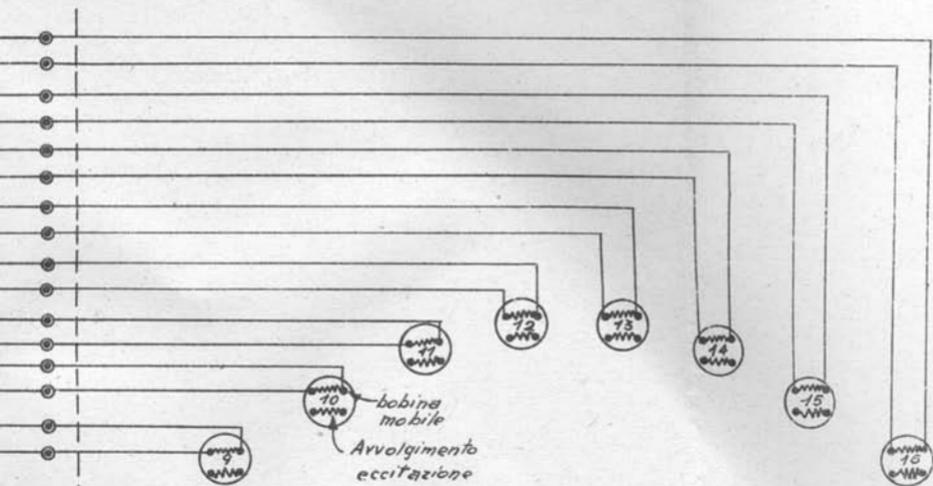
Amplificatore



Anelli e spazzole
di contatto



Compensatore



del rapporto segnale-disturbo; per contro si ha un notevole indebolimento del segnale utile. L'inserzione del filtro è lasciata al giudizio dell'operatore, ma, di solito, nella fase di ricerca di una sorgente sonora in acqua non si inserisce, mentre si inserisce nella fase di rilevamento.

§ 5) - Efficienza degli impianti idrofonici.-

Se i ricevitori sono abbastanza fedeli, cioè, riproducono abbastanza bene tutte le frequenze (specie oltre i 1000 Hz) senza esaltarne troppo alcune per effetto di risonanza proprie, un operatore addestrato può, dal ritmo del rumore percepito, riconoscere il tipo di sorgente sonora (sommergibile immerso, nave di superficie, ecc.).

La precisione media del rilevamento è di 2° e 3° , e le portate per sorgenti di intensità media, ed a velocità molto limitata della nave, sono da 5000 a 20.000 m. (maggiore d'inverno che d'estate).

Eccezionalmente, con sorgenti di rumore molto intense si sono ottenute portate di 50 e 80 Km.

Nella sistemazione a bordo per ridurre il fatto che, durante il moto, lo sciacquo delle onde disturbi le membrane degli idrofoni, questi devono essere immersi almeno 3 e 4 m. sotto il pelo libero, gli idrofoni possono talvolta essere sistemati in "tanche", ossia in cavità dello scafo riempite di acqua e separate dal mare per mezzo di membrane metalliche sottili, cioè trasparenti al suono.

Malgrado queste precauzioni, insieme al rumore, di cui si vuole individuare la direzione di provenienza, si raccolgono molti rumori parassiti costanti al variare della direzione di compensazione, eventualmente riducibili, come già detto, mediante l'inserzione di filtri passa-alto.

E' ad ogni modo già possibile un buon rilevamento quando circa il 20 e 30 % dell'energia acustica captata è energia utile, cioè subisce variazioni di fase per effetto della rotazione del volante che regola il numero di cellu

le di catena inserite. Naturalmente in conseguenza del mascheramento acustico prodotto dai disturbi, la precisione e la portata divengono molto minori.

La compensazione può essere fatta in un modo ben determinato quando sia fissa e nota la velocità c di propagazione del suono in acqua. Al variare di c varia il numero di cellule di catena inserite; ed in alcuni moderni tipi di compensatori è possibile regolare la disposizione delle spazzole in funzione del valore di c.

Gli impianti idrofonici possono essere installati anche su pesanti incastellature posate sul fondo marino a qualche miglio dalla costa (idrofoni costieri); rimanendo gli organi elettrici (compensatori, amplificatori, filtri ecc.) disposti a terra. In questo caso è necessario, nel progetto mettere in conto l'attenuazione e soprattutto, lo sfasamento provocato dai cavi sottomarini di collegamento tra gli idrofoni ed i rimanenti organi dell'impianto.

Il punto ove si trova la sorgente di rumore viene determinato per intersezione delle due direzioni determinate da due installazioni le cui basi, posate sul fondo, sono distanti tra loro qualche chilometro.

Occorre di tempo in tempo assicurarsi che le correnti o movimenti del fondo non abbiano spostato o ruotato le basi sostenenti gli idrofoni.

§ 6) -- Idrofoni per ultrasuoni.--

In speciali impianti idrofonici da installarsi a bordo di navi di modesto pescaggio, ad es. inferiore ai 3 m., laddove, per i troppi rumori parassiti ed la vicinanza della sorgente speculare rispetto alla superficie, in opposizione di fase, non darebbe risultati apprezzabili l'impiego di idrofoni normali, funzionanti nel campo sonoro, è possibile installare uno o più elementi idrofonici, sensibili agli ultrasuoni, fino a profondità di 1 a 1,50 m. dal pelo libero.

La esplorazione idrofonica viene effettuata rotando l'elemento od il complesso di elementi, cioè sfruttando la caratteristica naturale del gruppo, la cui base ha dimensioni assai grandi rispetto alla lunghezza di onda degli ultrasuoni captati.

L'energia emessa dalle eliche e dagli scafi nel campo degli ultrasuoni è assai minore di quella nel campo dei suoni, perciò occorre, in genere una maggiore amplificazione, L'energia emessa cala sempre all'aumentare della frequenza. La ricezione può essere fatta a mezzo di ricevitori idrofonici piezoelettrici o magnetostrittivi, preferibili questi ultimi perchè essendo a bassissima impedenza interna, non hanno alcuna importanza gli isolamenti elettrici dei conduttori dei ricevitori verso la massa della nave.

La ricezione può avvenire di tutte le componenti dello spettro del rumore, sia appartenenti al campo sonoro, che ultrasonoro, filtrando la zona di frequenze più basse; ad es. lasciando passare le componenti oltre 1000 o 2000 Hz, in modo da migliorare il rapporto tra il segnale ed i disturbi locali, successivamente amplificando per mezzo di un amplificatore demodulando e ricevendo in cuffia. In tale modo vengono utilizzate le componenti ultrasonore, sempre modulate da frequenze sonore, per mezzo della rivelazione ed amplificazione delle componenti di bassa frequenza modulatrici.

La ricezione è, si può dire, sonora ed ultrasonora nello stesso tempo, ed, abbracciando una assai vasta gamma di frequenza, si ha una maggiore sensibilità. Per contro la direttività resta assai diminuita, perchè la presenza di componenti dello spettro nel campo sonoro, dà una tensione di uscita dai ricevitori ben poco variabile con la direzione di provenienza. La direttività rimane quindi affidata praticamente alle sole componenti dello spettro nel campo ultrasonoro.

Un'altra via possibile di ricezione consiste nel ricevere unicamente le componenti ultrasonore, separandole, ad esempio, attraverso la risonanza propria ed assai acuta del ricevitore piezoelettrico o magnetostrittivo. In tal modo la potenza ricevuta è molto minore di quella del caso precedente, però è più acuta la direttività del complesso.

In questo caso, non essendo audibili gli ultrasuoni, per ottenere una ricezione in cuffia è necessaria una eterodinazione o una demodulazione delle frequenze sonore che sempre modulano gli ultrasuoni. Preferibile, per la maggiore sensibilità, è ovviamente l'eterodinazione.

Un impianto in ricezione idrofonica ultrasuonora, su base girevole (I.M.G.) è attuato con 6 ricevitori piezoelettrici o megnetostrittivi disposti su base orizzontale a distanza di circa 8 cm. l'uno dall'altro, con frequenza di risonanza propria a 10.000 ± 12.000 Hz. Si limita lo spettro di ricezione da un minimo di 500 ± 6000 Hz a 12.000 Hz per mezzo di un filtro regolabile passa-alto e della risonanza

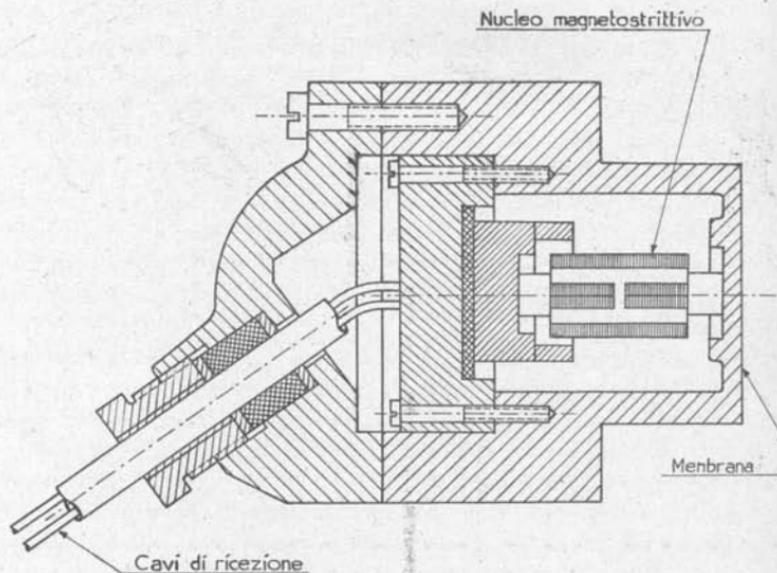
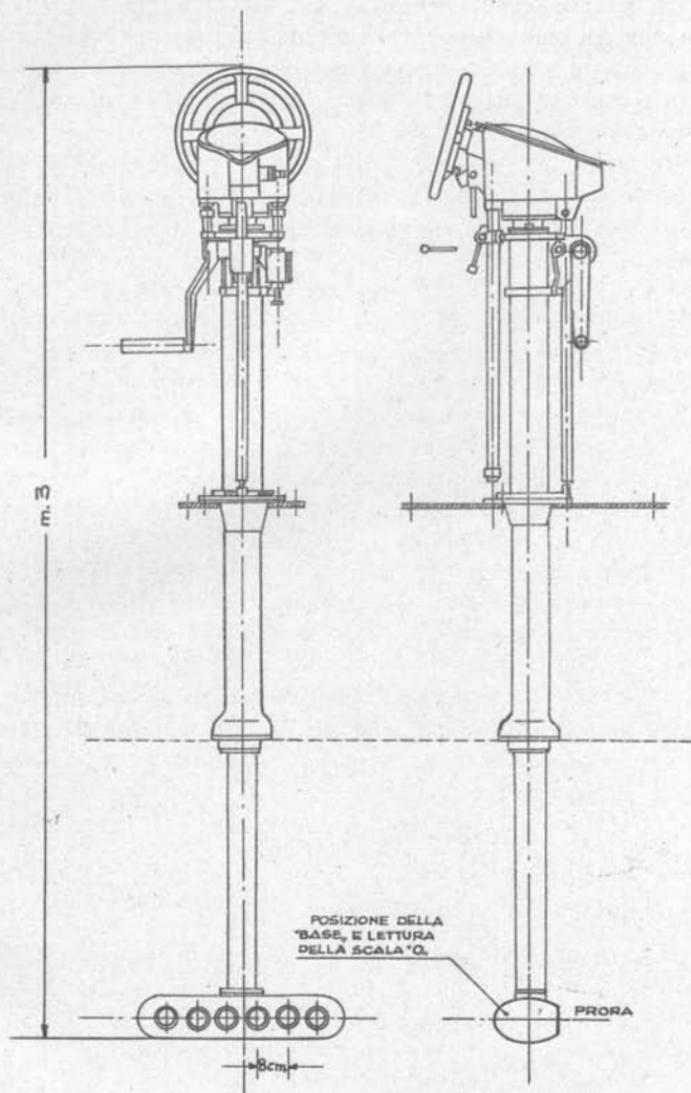


fig.123

stessa dei ricevitori. A mezzo di un amplificatore a resistenza e capacità, la ricerca ha luogo su una gamma assai vasta, sufficiente ad assicurare una discreta portata.



Impianto fuoriuscita.

fig. 124

In figura 123 è indicato l'aspetto di un ricevitore magnetostriativo, del quale del resto si parlerà in seguito, in figura 124 è indicata la disposizione della base, completamente fuoriuscita dallo scafo, ed in figura 125 è indicato lo schema generale delle apparecchiature, con base fuoriuscita dallo scafo.

Il movimento della base sopportante gli idrofoni è manuale, e l'orientamento della stessa è osservato a mezzo di un indice che corre su un quadrante direttamente vicino al volantino di manovra.

Un impianto per MAS e piccole unità chiamato "fonogoniometro per MAS", è basato sul principio di rilevare solo ultrasuoni in una ristretta gamma di frequenza attorno alla risonanza del ricevitore.

Il ricevitore è unico, generalmente magnetostriativo, munito di riflettore troncoconico in modo da equivalere ad un elemento di grande superficie.

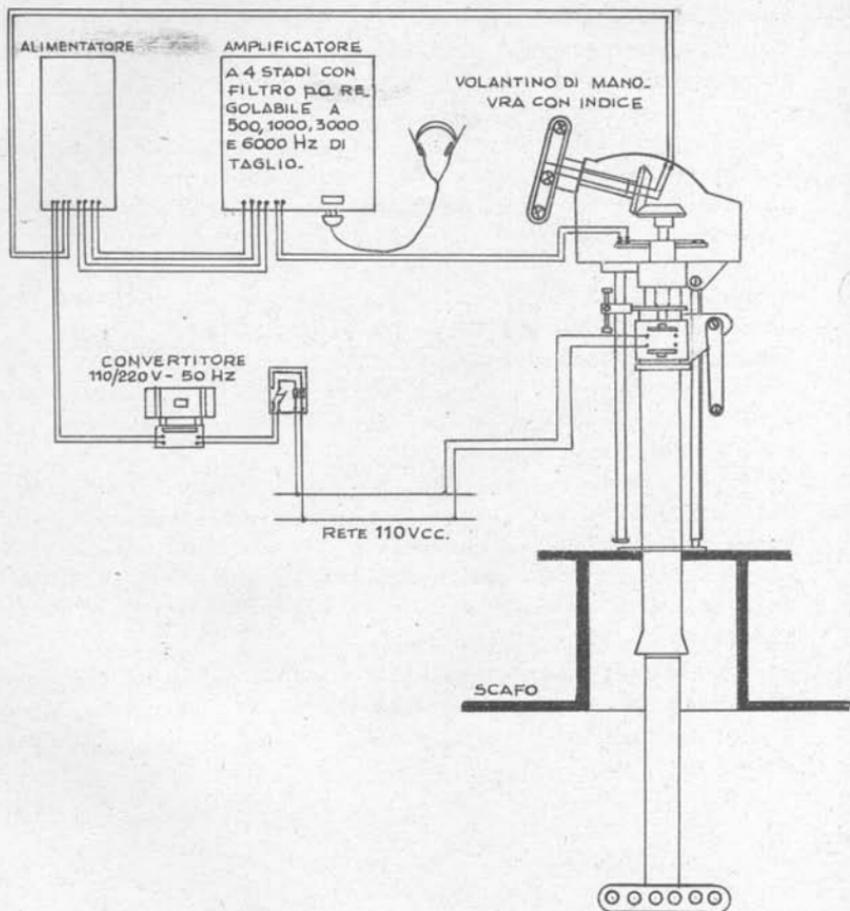
Le portate raggiungibili con questi apparecchi sono assai inferiori a quelle ottenibili con impianti sonori normali, ma tuttavia il sistema suddetto è l'unico adatto per la ricerca idrofonica a bordo di piccoli scafi sui quali ad es. piccole unità cacciasommersibili sui quali non darebbero buon risultato gli impianti normali.

In fig. 126 la caratteristica naturale di un fonogoniometro per MAS e in fig. 127 lo schema di massima dell'impianto. Ad un impianto idrofonico per ultrasuoni si dà talvolta il nome di "Perifono".

o o o o

o o

o



Schema di principio dell'impianto di idrofono per ultrasuoni, a testa girevole.

fig.125

Capitolo XIV

U L T R A S U O N I

—oO—

§1) - Generalità.-

Si chiama ultrasuono una vibrazione meccanica la cui frequenza è maggiore del limite superiore della gamma udibile; si può parlare di ultrasuono quando la frequenza della vibrazione è compresa tra

15.000 Hz e $+\infty$.

Fisicamente gli ultrasuoni non differiscono da suoni, pur tuttavia occorre tener presente quali conseguenze porti la loro più elevata frequenza.

Dalla relazione che dà la potenza specifica, cioè la potenza che transita attraverso l'unità di superficie, per onde sinoidali,

$$P_s = \frac{1}{2} \rho c \xi_{\max}^2 = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 \xi_{\max}^2 ,$$

si osserva che, a parità di potenza specifica P_s , nel caso di ultrasuoni gli spostamenti ξ_{\max} sono minori di quelli che si hanno nel caso dei suoni; ed in onde piane la pressione dell'onda migrante è:

$$p = p_{\max} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) ,$$

il cui gradiente è:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = p_{\max} \frac{\omega}{c} \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) ,$$

ha ampiezza proporzionale ad ω . La forza di compressione o decompressione che si esercita tra punti vicini del mezzo, non giacenti sullo stesso fronte d'onde a parità di potenza specifica, è maggiore per gli ultrasuoni che per i suoni.

Inoltre l'attenuazione nella propagazione dovuta alla viscosità del mezzo, che è proporzionale al quadrato della frequenza, è maggiore per onde ultrasonore che per onde sonore, (Cap. 1).

In aria l'attenuazione degli ultrasuoni, dovuta al mezzo (Cap. 15) per la piccolezza di ρ e c è così forte, che praticamente a distanza di pochi metri dalla sorgente non vi è più traccia apprezzabile di potenza ultrasonora.

Infine, per la piccola lunghezza d'onda, gli ultrasuoni possono essere emessi e ricevuti con particolare proprietà direttive, con generatori e ricevitori di dimensioni più modeste di quelli che danno la stessa direttività nel campo sonoro.

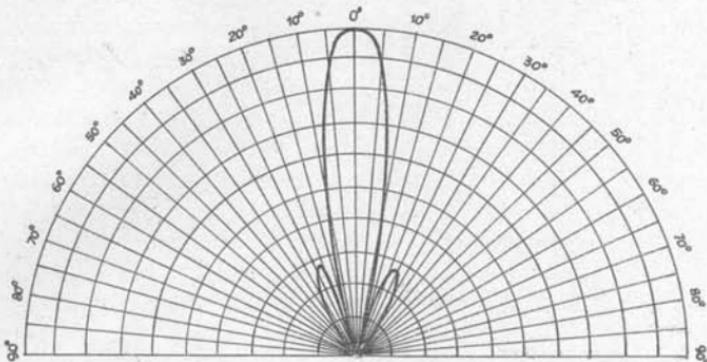


fig.126

La generazione di potenza ultrasonora porrebbe effettuarsi, partendo da potenza elettrica, con i cinque sistemi normalmente usati per la generazione dei suoni, sfruttando cioè i fenomeni elettrostatico, elettrodinamico, magnetostatico, piezoelettrico e magnetostrittivo.

I rendimenti con i primi tre sistemi però sono così estremamente bassi da costituire una trasformazione di potenza poco vantaggiosa.

Quando la frequenza della trasformazione sia una sola e determinata, si può invece operare la trasformazione di potenza, con un rendimento assai elevato, utilizzando fenomeni elettromeccanici con basse perdite per attriti interni, quali il fenomeno piezoelettrico ed quello magnetostrittivo, entrambi sfruttati alla frequenza di risonanza.

In entrambi questi fenomeni, alla risonanza il consumo

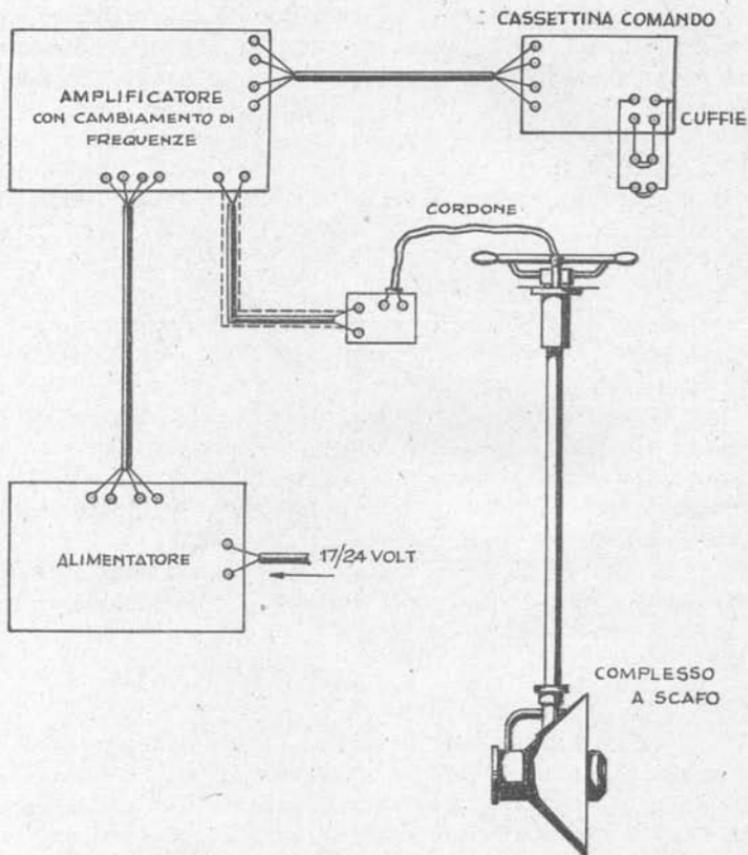


fig.127

mo di potenza è dovuto in buona parte al carico acustico, cioè al carico utile, mentre non sono eccessive le perdite elettriche e le perdite meccaniche.

I rendimenti che si raggiungono, per la frequenza di risonanza sono di conseguenza assai elevati, fino ad oltre al 50 % e quindi la trasformazione di potenza elettrica in acustica, per determinate frequenze ultrasonore, avviene con rendimenti paragonabili e superiori a quelli relativi alle trasformazioni elettro-acustiche campo dei suoni.

Esiste tuttavia anche la possibilità di generare ultrasuoni direttamente, senza partire da potenza elettrica, e senza passare attraverso la forma di potenza meccanica, bensì partendo da pressioni e velocità continue.

Il fischietto di Galton appartiene appunto al numero degli apparecchi che operano direttamente la trasformazione. Esso consiste in un generatore di un fenomeno di rilassamento analogo a quello che si ha nella canna ad organo, ove però un'onda stazionaria tra il foro del fischietto, attraverso il quale viene emesso un getto continuo di aria, ed un riflettore piano dirimpetto, a distanza regolabile a piacimento, favorisce la generazione di una determinata frequenza, con le sue armoniche.

Tuttavia, a prescindere da casi particolari come il suddetto, si preferisce generare ultrasuoni per via piezoelettrica o magnetostriettiva, per la maggiore solidità dei dispositivi e perchè è possibile così mettere in giuoco potenze maggiori e più comodamente dosabili.

Trattandosi, come è noto di fenomeni reversibili, per la stessa via si costruiscono anche i ricevitrici di ultrasuoni.

§ 2) - Piezoelettricità.

Una piastrina parallelepipedica, ottenuta da un cristallo piezoelettrico tagliato secondo determinati piani (fig. 128) normali agli assi di cristallizzazione gode di alcune proprietà. Ad esempio nel caso del quarzo dei sali di Rochelle (tarati doppi di sodio e potassio). L'asse ottico z , coincide con l'asse del prisma, esagonale, gli assi elettrici x sono orientati secondo le tre diagonali di una qualsiasi sezione piana, e gli assi piezoelettrici y secondo una delle tre mediane di una qualunque sezione piana.

Se si sottopone la piastra di cristallo ad un campo elettrico E_x diretto secondo x , essa modifica le sua dimen-

$$k = 2,12 \times 10^{-12} \text{ m/volt .}$$

Il taglio ora citato della piastra secondo gli assi del cristallo piezoelettrico, prende il nome di "tagli di Curie" ma anche ogni altro tipo di tagli, secondo direzioni inclinate qualsivoglia, dà luogo, in generale, ad effetti piezoelettrici. Anzi si sfruttano spesso tagli inclinati sugli assi di particolari angoli, per rendere minima dipendenza della variazione percentuale delle dimensioni geometriche secondo la direzione del campo applicato dalla temperatura.

Se il campo elettrico è alternativo la variazione di dimensioni risultano pure esse alternative e la perturbazione meccanica che si produce e che si propaga entro la massa del cristallo può dare luogo a fenomeni di risonanza su determinate frequenze funzione delle dimensioni stesse.

La risonanza meccanica (di una piastra in parallelepipedo, nel vuoto), vibrante secondo il suo spessore, è:

$$f = \frac{c}{2d} = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{E}{\rho}} ,$$

ove c è la velocità di propagazione della perturbazione nel cristallo, E è il modulo di elasticità del materiale solido costituente il cristallo, cioè quello che nei mezzi fluidi corrisponde al coefficiente di compressibilità κ e d lo spessore nel senso del campo applicato.

Per il quarzo, secondo l'asse y , è: $E = 7,7 \times 10^{10}$ Newton/m², e $\rho = 2650$ Kg/m³, da cui si ottiene:

$$f = \frac{2,87 \times 10^3}{d} ,$$

ove d è espresso in metri.

Si vede così che si possono ottenere frequenze di risonanza nel campo ultrasonoro con piastrine di dimensioni comodamente realizzabili.

Una piastra di quarzo, nel vuoto, sottoposta ad una tensione alternativa sinusoidale, alla frequenza fondamentale di risonanza $f_0 = \omega / 2\pi$ genera entro il suo spessore un'onda sonora, od ultrasonora, stazionaria in cui l'andamento della pressione p e della velocità ξ' in funzione dello spessore sono indicati in fig. 129 a). La pressione p_0 è massima in mezzeria, ed è nulla alle superficie libere, mentre la velocità ξ' , e quindi lo spostamento $\xi = \frac{\xi'}{\omega}$, è nulla in mezzeria, ed è massima ξ'_0 sulle superficie libere.

La dimensione trasversale d della piastra è pari esattamente a mezza lunghezza d'onda nel quarzo.

Se la piastrina è a contatto con un mezzo di determinata resistenza acustica ρc , alle sue superficie si genera una pressione pure sinusoidale di ampiezza di p_1 che viene applicata al mezzo stesso, e la velocità corrispondente assume un valore $\xi'_1 < \xi'_0$ (fig. 129 b), restando circa inalterata la pressione massima che si produce ancora in mezzeria.

La potenza specifica P_s erogata nel mezzo circostante, è

$$P_s = \frac{p_1^2}{2 \rho c}$$

La semi lunghezza d'onda risulta alquanto superiore allo spessore d della piastrina.

Se una delle superficie del quarzo è a contatto con

un mezzo avente una resistenza acustica ρc , e l'altra superficie è nel vuoto, gli andamenti della pressione e delle velocità dell'onda stazionaria sono indicati in fig. 129 c). Sulla superficie vibrante nel vuoto è nulla la pressione e massima la velocità φ_0' , sull'altra superficie la pressione è p_2 e la velocità è $\varphi_2' < \varphi_0'$; evidentemente solo

da questa parte viene erogata potenza acustica.

Per riflessione totale della perturbazione meccanica sulla faccia nel vuoto è $p_2 \simeq 2p_1$, e $\varphi_2' \simeq 2\varphi_1'$.

Analogamente a quanto accade, nel caso elettrico, per le tensioni a correnti in una antenna, la pressione e la velocità nella superficie vibrante nel mezzo non sono fra loro in fase.

In pratica, quanto si voglia realizzare un generatore o ricevitore piezoelettrico di ultrasuoni di dimensioni superiori a qualche centimetro, occorre incollare diverse piastrelle fra loro, formando così un mosaico, potendosi difficilmente disporre di una piastra unica di grandi dimensioni proveniente da un unico cristallo non geminato.

Se il cristallo piezoelettrico vibra in un mezzo di resistenza acustica assai diversa da quella del materiale costituente il cristallo, un adattamento di impedenza può essere fatto, come è noto, a mezzo di piastre di materiale avente resistenza acustica media geometrica tra le due, e di spessore pari ad un quarto di lunghezza di onda.

Per cristalli di quarzo vibranti in acqua, è assai conveniente unirli a piastre di acciaio che realizzano un certo adattamento di impedenza. L'attaccamento al quarzo, generalmente sotto forma di mosaico delle piastre metalliche, avviene con mastice. Esse servono allo stesso tempo anche come connessioni tra i pezzi componenti la piastra di quarzo, e come elettrodi per l'applicazione della d.d.p. che genera il campo elettrico entro il quarzo.

Le piccole piastrelle di pochi centimetri quadrati di superficie, per essere utilmente impiegate, devono essere controllate zona per zona per constatare se danno luogo al fenomeno piezoelettrico; e soprattutto se lo danno concordemente, perchè non è raro che, a causa di geminazioni, si

inverte, da zona a zona della stessa piastrina, la polarità del fenomeno piezoelettrico.

L'incollamento della piastrina di adattamento al mosaico di quarzo si fa a caldo con uno speciale mastice, il quale ha circa gli stessi coefficienti di elasticità e di temperatura del quarzo e dell'acciaio; ed è atto a sopportare forti sollecitazioni meccaniche.

Tuttavia l'incollamento di un mosaico di quarzo alle piastre di metallo è sempre assai critico e determina il valore esatto della frequenza di risonanza, la quale, da incollamento a incollamento, può come si è detto variare in un intorno assai ristretto di un valore medio, a causa dei differenti spessori di mastice introdotti e delle caratteristiche elastiche del mastice stesso.

Il "sandwich" così formato può entrare in risonanza anche sulle armoniche, salvo che le risonanze di queste possono aver luogo solo nelle impari, perchè sulle armoniche pari; il cristallo, che è il generatore della pressione, verrebbe a trovarsi in un nodo di pressione anzichè in un ventre, e verrebbe a mancare la possibilità di oscillazione.

Da quanto è stato ora detto si vede quindi che per calcolare la frequenza fondamentale di risonanza di un sandwich o acciaio - mastice - quarzo - mastice - acciaio, non ci si può riferire alla semplice relazione citata precedentemente a proposito dei cristalli di quarzo nel vuoto, poichè, ovviamente, a stabilire questa frequenza intervengono, oltre il quarzo, anche i dischi di acciaio e il mastice di collegamento che costituiscono un unico blocco compatto.

Si possono calcolare, con sensibile approssimazione, le frequenze proprie del sistema in base alla relazione, ottenuta sperimentalmente:

$$f = n \frac{2.43 \times 10^3}{d}$$

essendo d lo spessore totale espresso in metri, ed n l'ordine dell'armonica.

Per realizzare un generatore di ultrasuoni, chiamato anche proiettore, veramente efficace occorre che il quarzo sia puro, esente da geminazioni, tagliato esattamente secondo le direzioni prescritte, e che le piastrine siano poste in opera in maniera conveniente.

Nei primi generatori di ultrasuoni non si teneva alcun conto degli orientamenti relativi agli assi Y e Z delle varie piastrine costituenti il mosaico, e pertanto veniva formato, in un modo qualsiasi (fig. 130). Successivamente si è considerata l'opportunità dell'orientamento relativo

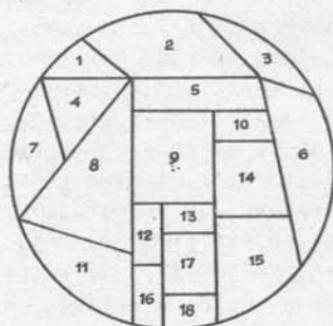


fig. 130

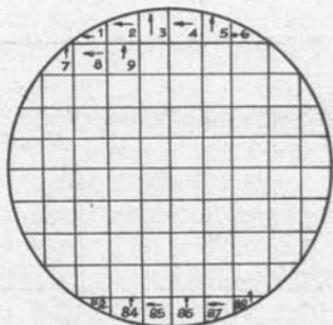


fig. 131

degli assi della varie piastrine nella costruzione del mosaico ai fini di ridurre la sollecitazione tangenziale a cui il mastice è sottoposto.

Può essere utile usare piastrine di forma regolare, quadrata, e disporle nel modo indicato nella fig. 131, e cioè le direzioni degli assi ottici Z e piezoelettrici Y adiacenti, fra loro normali. La freccia posta su ogni lamina indica la direzione dell'asse ottico Z. L'asse Y giace naturalmente anch'esso nello stesso piano della piastrina ed è normale all'asse Z.

Poichè, come si è visto, la deformazione secondo l'asse X, che viene utilizzata per produrre l'oscillazione delle piastre di acciaio, è sempre accompagnata da deformazioni secondo l'asse Y, proporzionali alle dimensioni della piastrina secondo questa direzione e poichè generalmente questa dimensione è più rilevante di quella nel senso della spessore, il movimento vibratorio può essere abbastanza sensibile, e tale da sollecitare il mastice sino a staccare le superfici incollate. Poichè non vi è deformazione secondo l'asse Z converrebbe usare cristalli di forma rettangolare con la dimensione maggiore secondo l'asse Z. Praticamente la disposizione adottata è quella della fig. 130, cioè piastrina di forma quadrata, di dimensioni abbastanza limitate (3 e 5 cm. di lato), ed orientate nel modo anzidetto, per ripartire uniformemente lo sforzo sul mastice.

Si intende per circuito equivalente del proiettore piezoelettrico un bipolo tale che applicando ai suoi morsetti una tensione sinusoidale uguale a quella applicata alle facce del proiettore, la corrente i che circola è, per qualsiasi frequenza, uguale in ampiezza e fase a quella che circola nei conduttori di alimentazione del proiettore.

Il circuito equivalente di un proiettore piezoelettrico è formato (fig. 132 a)-b) da una capacità C, una induttanza L ed una resistenza R in serie; ed al complesso è posta in parallelo la capacità C, propria del proiettore.

La risonanza serie si ha quando la frequenza eccitatrice è di valore f_1 tale da dar luogo la risonanza della

serie tra C ed L .

In queste condizioni a parità di tensione di alimentazione, $V_0 \text{ sen } \omega t$, la ampiezza I_0 della corrente $I_0 \text{ sen } (\omega t - \varphi)$ circolante nel circuito, e quindi anche nel generatore piezoelettrico, è massima. Una risonanza parallelo, peraltro ad una frequenza f_2 maggiore, ma vicinissima alla precedente, si ha per la risonanza della L con la capacità risultante dalla serie di e di C_0 e C , cioè $C_0 C / (C_0 + C)$.

L'andamento del modulo $|Z|$ della impedenza è indicato in fig. 133.

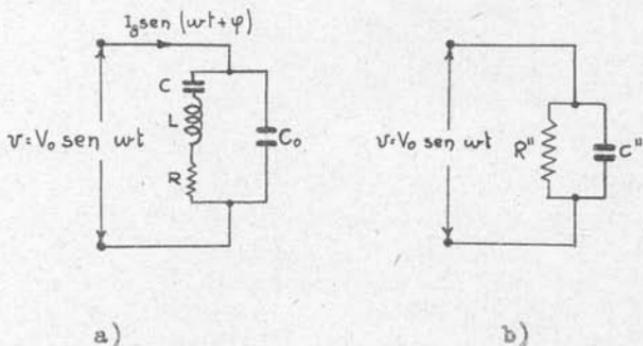


fig. 132

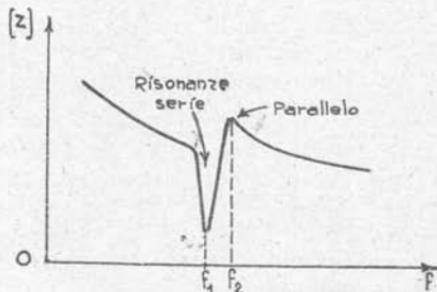


fig. 133

Il valore della resistenza R è variabile a seconda che il generatore di ultrasuoni emette in aria od in acqua. Il valore di R in acqua è 4 e 5 volte quello che assume in aria; per un mosaico di circa 20 cm. di diametro, con piastre di acciaio di 30 mm. di spessore, R è circa 100.000 Ω in acqua e 20.000 Ω in aria. Il valore di R rappresenta in sostanza la reazione del carico acustico sul circuito elettrico equivalente del proiettore, e l'intervallo in cui R può variare per un determinato mezzo a contatto del proiettore è funzione solo della diversa bontà e riuscita dell'incollamento delle piastre di acciaio al mosaico da quarzo.

Il fenomeno piezoelettrico è, come è noto, reversibile, cioè allorchè un cristallo piezoelettrico viene sottoposto ad una sollecitazione secondo determinati assi, si genera una quantità di elettricità sulle facce tra le quali agisce la sollecitazione, e poichè esse formano un condensatore, si genera una differenza di potenziale.

Questo fenomeno inverso, che avviene sia per le pressioni continue sia per le alternative, dà luogo alla risonanza per la stessa frequenza alla quale si ha quella del fenomeno piezoelettrico diretto, in quanto per un dato materiale, definita da sole grandezze geometriche.

I materiali piezoelettrici sono, oltre il quarzo, i sali di Rochelle (o di Seignette) già citati, anche la tormalina, e tutta una serie di materiali artificiali, che oggi ammontano a varie decine.

Il sale di Rochelle viene usato per apparecchi piezoelettrici nel campo acustico, ma a causa della sua fragilità non si adopera per la generazione di ultrasuoni, mentre potrebbe venire usato per la ricezione di ultrasuoni, avendo un effetto piezoelettrico 10 volte circa quello del quarzo.

Tuttavia il sale di Rochelle, anch'esso del resto in generale ottenuto per coltivazione, è assai igroscopico e perde assai bruscamente le proprietà piezoelettriche quando la temperatura supera 40° e 50°.

La coltivazione avviene partendo da soluzioni acquose soppresature ed asportando il solvente, per mezzo di sostanze igroscopiche poste nelle vicinanze ed in ambiente chiuso,

ad es., acido solforico concentrato. Si ottiene così un lentissimo accrescimento di un germe cristallino durante il quale occorre evitare vibrazioni affinché non si produca un brusco aumento della cristallizzazione generalmente accompagnato da dannose geminazioni nel cristallo.

Un limite più elevato della temperatura a cui cessano le proprietà piezoelettriche $70 \text{ a } 80^\circ$ può aversi coltivando il sale di Rochelle in acqua pesante (costituita con un isotopo dell'idrogeno, il deuterio, il quale ha un neutrone nel nucleo).

La tormalina non può essere usata per la sua fragilità ed alterabilità.

Tra i molti cristalli recentemente trovati, aventi proprietà piezoelettriche sono da annoverarsi vari tartarati doppi che sono coltivati per accrescimento di germi in lento moto in una soluzione soprassatura, gradualmente svaporante. Le proprietà piezoelettriche di alcuni di questi cristalli artificiali sono più spiccate di quelle del sale di Rochelle, e per quanto non siano stati ancora usati, essendo di recentissima realizzazione (fatta soprattutto allo scopo di costruire filtri di banda telefonici) è da ritenersi che, per la loro robustezza, siano adatti anche alla generazione di ultrasuoni.

Un'altra via possibile per ottenere cristalli consiste nel fare raffreddare lentamente una fusione, ma questo procedimento per difficoltà tecnologiche non è pratica come il precedente.

§3) Magnetostrizione.

Come magnetostrizione si definisce la proprietà che ha un corpo di alterare le sue dimensioni in presenza di una induzione magnetica.

Per la generazione di oscillazioni acustiche ed ultrasoniche si sfrutta l'allungamento e l'accorciamento di aste o lamelle di materiale ferromagnetico sottoposte ad un campo magnetico alternativo. Per una certa frequenza nel campo es-

citatore, funzione delle caratteristiche elastiche e geometriche del materiale, le variazioni di dimensioni raggiungono un valore massimo cioè la, risonanza, limitate solo dall'attrito interno molecolare del materiale stesso, e dall'eventuale carico acustico.

Ad esempio, per un anello di materiale magnetostrittivo di diametro medio D_m disposte nel vuoto e sottoposto ad una induzione secondo l'anello stesso, la frequenza f_0 di risonanza è:

$$f_0 = \frac{c}{2 \pi D_m}$$

ove c è la velocità del suono nel materiale.

Reciprocamente se il materiale è sede di una f.m.m. costante, per variazioni di dimensioni del materiale prodotte meccanicamente da un agente esterno, il quale può essere anche la pressione dell'onda sonora che investe il materiale, l'induzione magnetica nel materiale, presenta delle variazioni.

In fig.134 sono riportate le variazioni percentuali di lunghezza del ferro, cobalto e nichel in funzione del campo

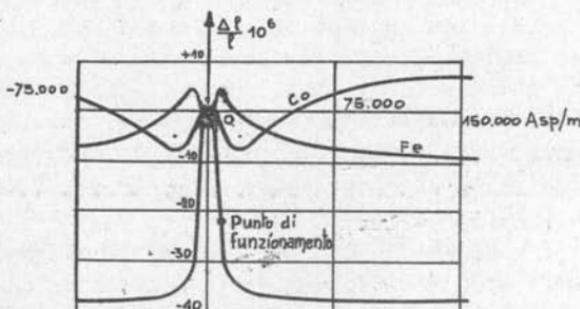


fig.134

magnetico continuo. Una sbarra di nichel per piccoli campi si accorcia di una percentuale assai alta; aumentando il campo l'accorciamento cresce poi di poco tendendo verso una saturazione magnetostrittiva. Per il nichel sembra infatti vi sia proporzionalità tra la deformazione percentuale e la induzione. Questo semplice andamento non è mostrato da altri materiali ferromagnetici.

Essi hanno un punto di inversione (punto di Curie) oltre in quale, aumentando il campo, la deformazione si inizia in senso contrario. Gli andamenti delle curve riportate sono però molto dipendenti dalla temperatura e dai precedenti trattamenti termici subiti dal materiale.

Dalle curve di fig. 134 risulta che per ottenere oscillazioni meccaniche di notevole ampiezza, è necessaria una certa induzione continua, alla quale se ne sovrapponga una alternativa dello stesso ordine di grandezza. L'induzione continua, cioè la polarizzazione, è indispensabile per evitare il raddoppiamento di frequenza della oscillazione meccanica, rispetto all'oscillazione elettrica. Il campo magnetico alternativo dà una perdita per isteresi magnetica, ed una per isteresi meccanica, in modo che il comportamento reale di una asta vibrante di materiale ferromagnetica è assai più complesso di quanto non sia il comportamento di un vibratore piezoelettrico.

Nelle applicazioni pratiche viene normalmente usato il nichel in sottili lamine, preferibilmente isolate per ossidazione, attraverso un particolare trattamento termico in ambiente ossidante. Quando lo strato di ossidazione sulle lamine non resiste in contatto col mezzo entro cui si vuole generare l'ultrasuono, ad es.: l'acqua di mare, si dispone un mezzo intermedio di adattamento, il quale non alteri lo strato di ossido. Tale mezzo può essere anche acqua dolce.

La corrente eccitatrice circola in poche spire avvolte sul pacco, o rotolo lamellare, al quale può essere collegata, una membrana vibrante a contatto nel mezzo entro il quale si deve generare l'ultrasuono, oppure il pacco può vibrare direttamente nel mezzo stesso.

I rendimenti che si raggiungono alla risonanza principale, quando il pacco lamellare è posto in acqua, raggiungono 40 + 50%.

Si possono dare varie forme al nucleo magnetostrittivo: nastri arrotolati, tubi concentrici, o pila di lamierini sovrapposti. (figg. 135-136). La laminazione e l'isolamento tra le lamine è sempre indispensabile.

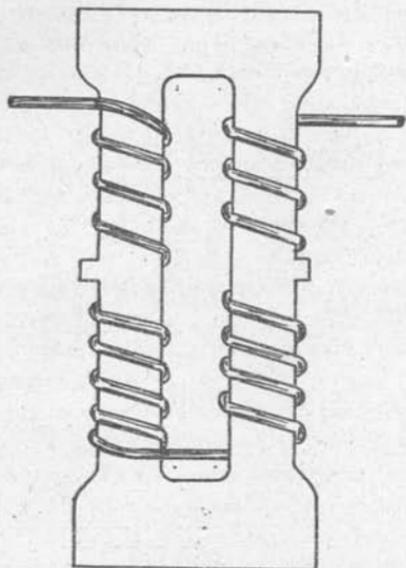
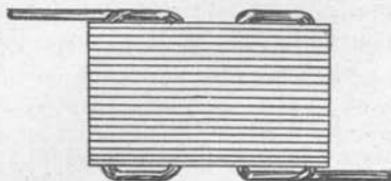


fig. 135



fig. 136

Un riflettore dietro un generatore di questo tipo può contribuire a dirigere entro un stretto angolo attorno ad una direzione determinata la potenza ultrasonora che, va altrimenti distribuita in un vasto angolo solido.

Il circuito equivalente di un oscillatore magnetostrittivo è rappresentato in fig. 137. La L e la R sono la induttanza e la resistenza propria dell'avvolgimento alla frequenza considerata, L_1 , C_1 ed R_1 sono grandezze fittizie che definiscono la reazione sul circuito elettrico reale della vibrazione del materiale ferromagnetico. La R_1 rappresenta il carico acustico utile e la R le perdite passive (meccaniche, magnetiche, per isteresi ed elettriche per correnti di Foucault).

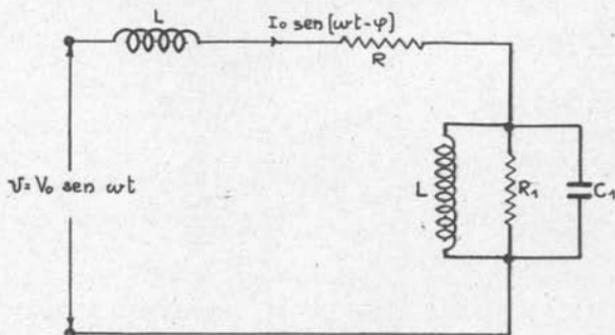


fig. 137

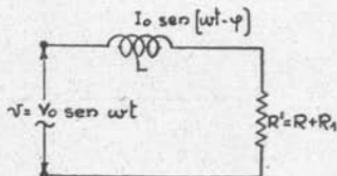


fig. 138

Alla frequenza di risonanza meccanica, il circuito elettrico fittizio risulta pure è in risonanza; e l'impedenza totale è pari alla induttanza L con serie una resistenza $R' > R$ (fig. 138).

In acqua R , è minore che in aria; un avvolgimento di 20 spire attorno a un nucleo anulare di 15 cm. di diametro esterno e 10 cm. di altezza, R è $\sim 10 \Omega$ in acqua e $\sim 30 \Omega$ in aria.

L'impedenza del circuito di un generatore magnetostriativo ha il modulo che varia in funzione della frequenza come è indicato in figura 139.

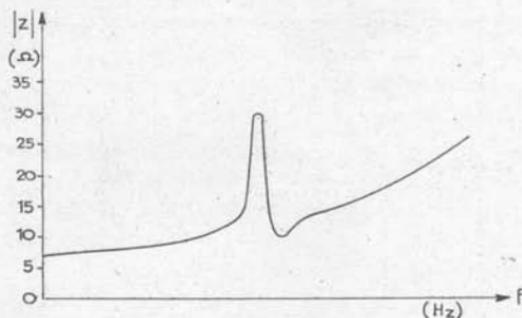


fig. 139

Invece, come si è visto, il circuito equivalente di un oscillatore piezoelettrico alla risonanza è rappresentato da una capacità C'' con una alta resistenza R'' in parallelo (fig. 132 b).

Mentre dal punto di vista del rendimento i due sistemi sono paragonabili e non vi sarebbe motivo di preferire l'uno e l'altro, da un punto di vista applicativo è preferibile il sistema magnetostriativo,

sovratutto nei riguardi dell'isolamento. Inoltre i generatori magnetostrittivi di ultrasuoni non hanno bisogno di parti incollate fra di loro, che, come è stato accennato, costituiscono il punto più debole dei generatori piezoelettrici.

Le frequenze di risonanza che praticamente si possono ottenere per via magnetostrittiva vanno da un minimo di 5 kHz ad un massimo di 50 kHz, mentre per via piezoelettrica vanno da un minimo di 15 kHz ad un massimo di qualche centinaio di megahertz, naturalmente operando su armonica.

Infine i proiettori magnetostrittivi hanno una frequenza ben determinata, dipendente dalle dimensioni fisiche fissate in sede di costruzione, mentre la frequenza di risonanza dei proiettori piezoelettrici, per effetto della presenza del mastice varia da volta a volta, sia pure in un intervallo modesto, a seconda della quantità del mastice e delle modalità di incollamento. Questo inconveniente porta come conseguenza che la ricezione per via piezoelettrica di un ultrasuono emesso pure per via piezoelettrica si effettua efficacemente, ossia con le frequenze di risonanza coincidenti, solo quando lo stesso dispositivo piezoelettrico viene commutato da generatore a ricevitore.

Con il sistema magnetostrittivo il generatore può essere distinto dal ricevitore, restando tuttavia assicurata la coincidenza della frequenza di risonanza.

Le applicazioni degli ultrasuoni sono innumerevoli; dalle militari delle quali le navali verranno esposte in seguito, chimiche e biologiche, dalle industriali alle terapeutiche.

Capitolo XIV°

S C A N D A G L I



§ 1 - Generalità.

E' di capitale importanza, per un bastimento, poter conoscere con precisione e continuità la profondità esistente sotto la chiglia, specie quando debba navigare in bassi fondali.

La soluzione di questo importante problema può essere ottenuta con mezzi acustici, misurando il tempo che intercorre fra l'emissione di un'onda sonora ed il ritorno dell'eco.

Una eco ben distinta può aversi da una emissione sono-

ra direttiva verso il fondo del mare in modo da misurare la profondità media di un'area piuttosto ristretta al di sotto della nave.

Per ottenere questa emissione direttiva usando un suono di frequenza udibile (al di sotto di 15 kHz), occorrerebbe impiegare un gruppo di trasmettitori posti a distanza opportuna e dipendente dalla lunghezza d'onda del suono emesso.

Il numero dei trasmettitori diminuisce al diminuire della lunghezza d'onda del suono, cioè all'aumentare della frequenza, fino ad arrivare, per frequenze ultraudibili, ad un trasmettitore solo nel quale si sfruttano le proprietà direttive delle superfici vibranti di dimensioni grandi, rispetto alla lunghezza d'onda.

Gli apparecchi di scandaglio sono infatti costituiti da dischi vibranti, o da trombe con bocca di 10 e 15 cm. di raggio, emittenti un ultrasuono di una frequenza dell'ordine delle decine di migliaia di hertz.

Un tipo molto diffuso nella nostra Marina Militare è costituito da un proiettore di 220 mm di diametro, che lavora ad una frequenza ultrasuonica di 36 e 37 kHz, ottenuta con sistema piezoelettrico.

L'angolo di apertura del cono contenente il lobo principale della caratteristica di emissione è:

$$\alpha = \text{arc sen } \frac{3,8}{\pi} \frac{\lambda}{d} = 13^\circ ;$$

e l'angolo solido Ω corrispondente, espresso in radianti, è:

$$\Omega = 0,37 \pi \left(\frac{\lambda}{r}\right)^2 = 0,16 .$$

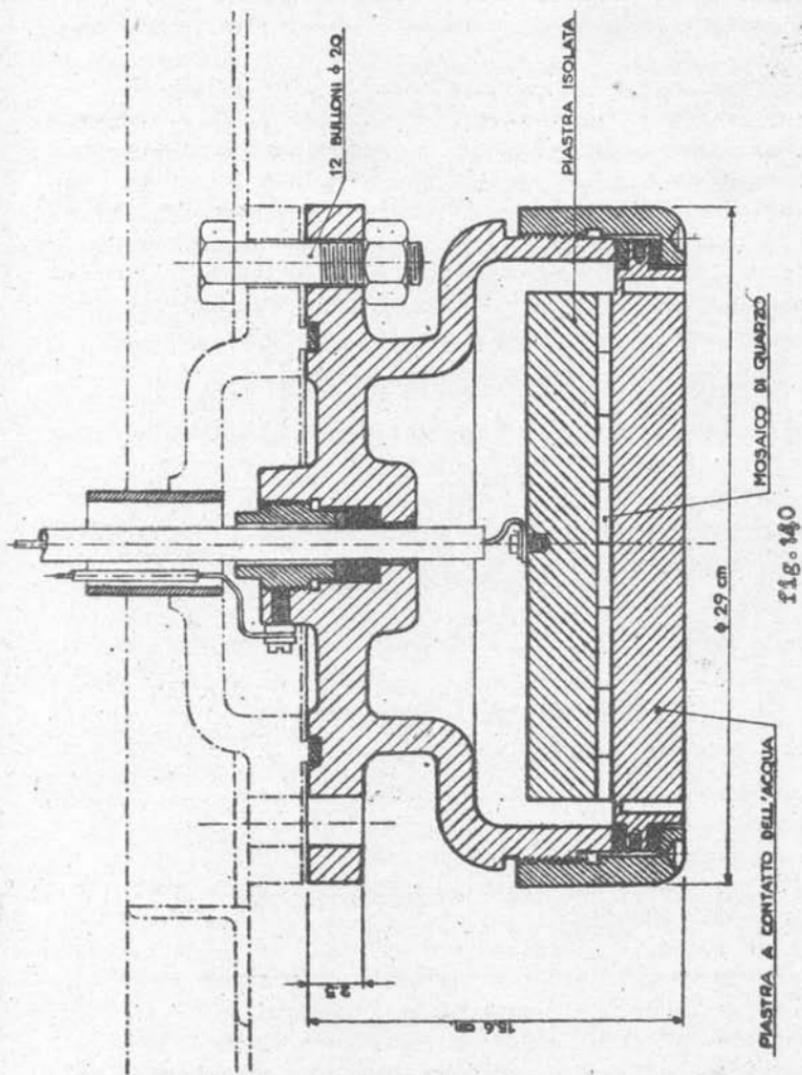
Attualmente lo scandaglio ultrasonoro è un organo decisamente uscito dalla fase sperimentale e che raggiunto un grado di sicurezza tale da permettere l'adozione in tutte le unità militari e civili.

Ad esso non sono più state apportate modifiche sostanziali da vari anni, ma piuttosto è stata migliorata la sua realizzazione tecnologica e la praticità, robustezza, per renderlo sempre più rispondente all'ambiente di bordo ed ai bisogni di impiego.

§ 2) - Scandagli piezoelettrici.

Il proiettore piezoelettrico con piastre di acciaio di adattamento, chiamato "tipo Langevin"^(*) è costituito da un sandwich circolare incollato con mastice, acciaio-quarzo-acciaio poste entro una custodia di acciaio fuso dove apposite guarnizioni garantiscono la tenuta stagna (fig. 140). Il valore medio dello spessore è di 64,5 mm (4,5 mm. per il quarzo e 30 mm. per ciascuna delle piastre di acciaio), a cui corrisponde una frequenza di risonanza di circa 37000 Hz. Un cavo ad alto isolamento, partendo da un polo dello apparecchio elettrico eccitatore, va direttamente alla pia-

(*) - "tipo Langevin" dal nome di colui che l'ha per primo realizzato.



stra isolata posta a contatto dell'aria mentre l'altro polo, tramite la massa dello scafo è a diretto contatto con la piastra emittente l'ultrasuone nell'acqua.

L'installazione, nel caso di sommergibile, è indicata in fig. 141.

La tensione di eccitazione è circa 1600 e 1800 V.

Per quanto è stato accennato (Cap. XIV), in conseguenza non si riesce sicuramente a far coincidere le frequenze di risonanza di due apparecchi identicamente costruiti ed anche se si riesce, incollando nuovamente i mosaici, non è affatto sicuro che la coincidenza permanga. Quindi non è possibile effettuare la trasmissione dell'ultrasuone con un apparecchio e la ricezione con un altro; bensì si usa lo

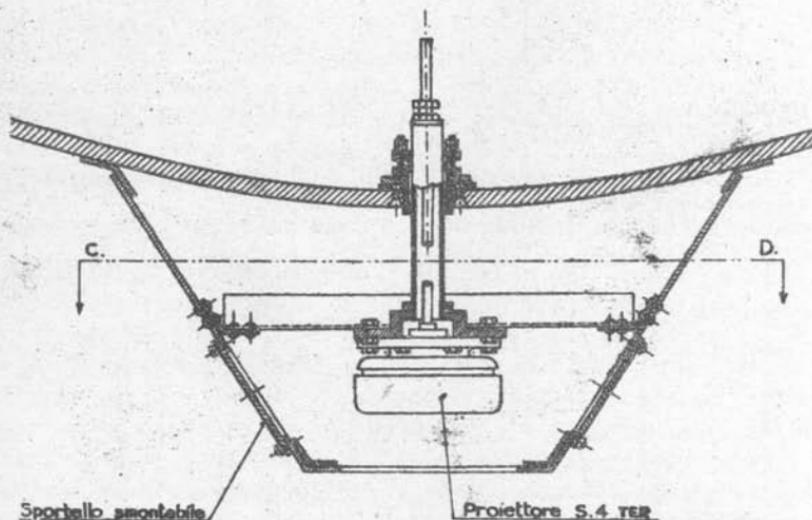


fig. 141

stesso "sandwich" per la trasmissione e la ricezione; comandandole solo dalla posizione connessa al generatore elettrico alla posizione connessa all'amplificatore.

Affinchè la fase di emissione dell'ultrasuono sia distinta dalla fase di ricezione, è necessario che l'emissione del segnale sia terminata quando la eco prodotta dal fondo giunge al proiettore ultrasonoro. Se si scandaglia in piccolissimi fondali, il tempo t che separa il segnale dalla eco è assai breve, data la velocità del suono nell'acqua, e poichè lo scandagliare in fondali dell'ordine di 10 m. e meno, è particolarmente interessante ai fini della navigazione, è indispensabile emettere un segnale ultrasonoro cortissimo.

Per questa ragione si utilizza un'emissione formata da un unico treno d'onde smorzate valendosi di un trasmettitore a scintilla con eccitazione ad impulso.

Lo schema di tale trasmettitore è indicato nella figura 142.

Quando si abbassa il tasto T una forte corrente data dal generatore di c.c. G circola nel primario del trasformatore TR ed una forte f.e.m. istantanea viene indotta nel secondario che ha un numero di spire assai maggiore del primario. Poichè il circuito è aperto, attraverso le grosse induttanze di arresto L_1, L_2 la d.d.p. si localizza agli estremi dello spinterometro S_P . Ad un certo istante allorchè la d.d.p. ha raggiunto un certo valore, si produce una scintilla, e nel circuito risonante composto da L e C, accordato alla frequenza del proiettore piezoelettrico, ha sede una oscillazione smorzata. Nella induttanza L' accoppiata induttivamente con la L viene indotta una f.e.m. che segue lo stesso andamento della corrente oscillante smorzata che circola in L e C. Questa f.e.m. indotta viene applicata al sandwich e questo emette un treno smorzato di onde ultrasonore in acqua. Uno scaricatore Se impedisce che la tensione istantanea applicata al sandwich superi il limite ammissibile per la sicurezza di funzionamento del proiettore (2000 + 2500 V.).

Il ricevitore è costituito da un amplificatore con filtro a raddrizzare, e da un galvanometro balistico a specchio.

I due conduttori P, M, (fig.143) sono connessi all'entrata dell'amplificatore, tramite un partitore formato da

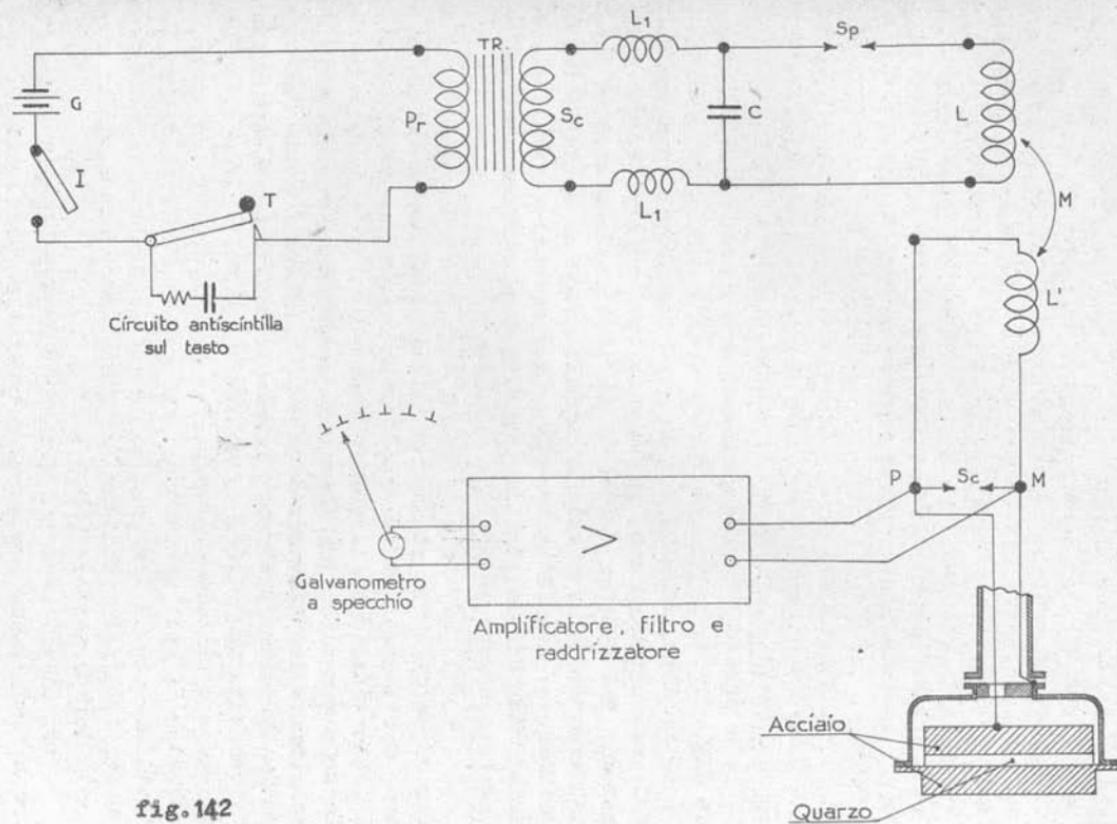


fig. 142

una alta resistenza R con un tubo a gas T.

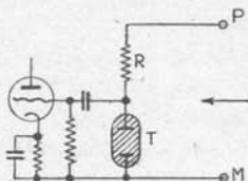


fig.143

Ne viene di conseguenza che nella fase di trasmissione all'entrata dell'amplificatore viene applicata una tensione di oltre 1000 V, che innesca il tubo a gas e tra filamento del primo tubo viene ad essere applicata, per una piccola frazione di secondo, una tensione alternativa dell'ordine di pochi volt. L'amplificatore va comunque in saturazione, ed il galvanometro a specchio ha un forte sussulto; ma finito l'impulso di emissione il tubo a gas si disinnesca e, per la piccola costante di tempo di tutti i circuiti, l'amplificatore è pronto a rilevare una piccola d. d.p. che si sviluppa tra P ad M e che permette di fissare nel tempo, otticamente e talvolta anche acusticamente, l'istante della ricezione dell'eco.

La corrente, amplificata e raddrizzata circola nell'avvolgimento del galvanometro G (fig.144) il quale fa deviare bruscamente il raggio luminoso normalmente ad una scala

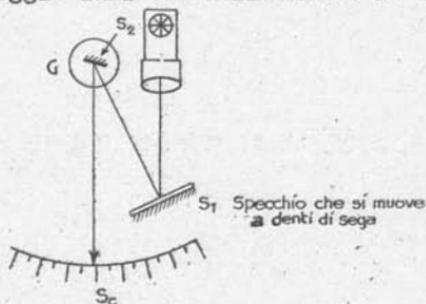


fig.144

graduata S_2 , nella quale la traccia luminosa si muove di moto a denti di sega, in conseguenza del moto di uno specchio S_1 intermedio. Un secondo specchio S_2 in cui il raggio si riflette prima di raggiungere le scale graduate è appunto quello del galvanometro.

Il movimento dello specchio S_1 , sincronizzato con la emissione di treni d'onda, è provocato da un congegno di orologeria in modo tale che il raggio luminoso possa descrivere con velocità uniforme la traccia sulla scala graduata da A verso B e ritorni poi istantaneamente in A per riprendere il moto uniforme.

Quando un impulso di corrente giunge a far ruotare lo specchio S_2 il raggio luminoso subisce uno spostamento nel senso verticale per cui l'osservatore può notare sulla scala graduata la traccia di un dente nella linea del punto luminoso (fig.145)

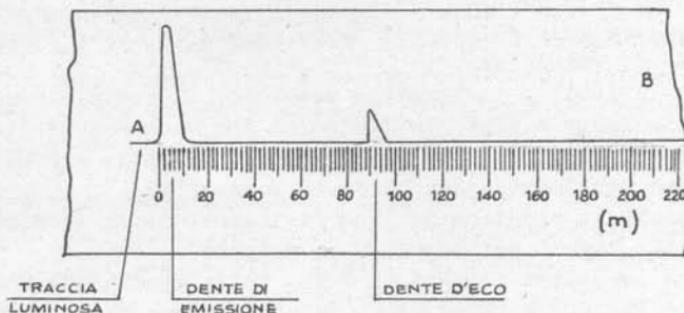


fig.145

Essendo il ricevitore sempre collegato al proiettore ultrasonoro tale dente si forma al momento dell'emissione e successivamente compare con la eco.

Questo dispositivo di indicazione si chiama ecometro.

E' evidente come, data la velocità della propagazione nel

la acqua, si può tarare la scala in modo che la lettura diretta in corrispondenza del dente d'eco dia direttamente la profondità.

Il meccanismo di orologeria viene caricato mediante apposita chiave, e inoltre a fornire il moto allo specchio piano, comanda il tasto T del trasmettitore (fig. 144) in modo da rendere regolare nel tempo l'emissione dei treni d'onda.

Per la messa in moto dell'apparecchio basta semplicemente aprire il portello anteriore dell'ecometro e premere il bottone di manovra, facendo azionare automaticamente tutti gli interruttori.

Nel caso di fondali completamente sconosciuti e soprattutto per alte profondità, è bene confrontare la misura ottica con quella acustica fatta a mezzo di una cuffia inserita in parallelo sull'amplificatore.

Lo scandaglio dà la profondità in fondali non troppo piccoli, superiore a qualche diecina di metri con un errore relativo dell'ordine dell'1 o/o.

Dalla forma del dente di eco si può, con buona approssimazione, rilevare le condizioni del fondo; quando il fondo è piano e orizzontale, il dente di eco ha forma identica al dente di emissione.

Se il fondo è inclinato e sabbioso, il dente di eco diviene più largo e come costituito da una successione di piccoli denti; se il fondo è molto inclinato oppure è gradini si vedono ugualmente piccoli denti successivi.

Esiste un più recente tipo di indicatore di profondità largamente basato sul seguente principio:

Una lampadina al neon di forma molto appiattita ruota con velocità costante su di un circolo graduato in profondità. L'emissione del segnale ultrasonoro viene fatta quando la lampadina passa per una determinata posizione sul circolo.

Il treno delle onde di eco, amplificato, rilevato può, per un brevissimo intervallo, accendere la lampadina quando questa, durante il suo movimento, si trova in una certa posizione sulla scala. In corrispondenza di questa posizione si eseguisce direttamente la lettura della profondità del fondale.

Dalla larghezza, ed eventualmente dalla molteplicità del segnale luminoso si può talvolta, anche in questo caso, dedurre qualche elemento riguardo alla costituzione del fondo marino.

Un altro tipo di ecometro a registrazione continua è costituito da uno stilo scrivente su una striscia di carta colorata cerata. La punta sfiorando la carta descrive degli archi a velocità costante in un senso e ritorna istantaneamente nella posizione di partenza. Poichè la striscia di carta si muove con velocità costante gli archi, riferiti alla striscia risultano l'uno vicino all'altro.

La punta se comandata da un relè ha un sussulto al momento dell'emissione dell'impulso cioè all'inizio di ogni corsa, e un altro sussulto all'arrivo dell'eco, causando una incisione dello strato di cera attraverso la quale compare la colorazione della carta.

Oppure la corrente di uscita dell'amplificatore passa tra la punta e la carta provocando un grafico dello strato di cera. Si può così registrare, con la successione della incisione direttamente il profilo del fondo marino. Questo sistema è molto utile perchè conserva traccia degli scan dagli già effettuati.

§ 3) - Scandagli magnetostrittivi.

L'impianto di scandagli magnetostrittivi è costruito nel modo schematicamente indicato in fig. 146.

Al pacco lamellare di nichel è spesso collegata una piastra per aumentare la superficie a contatto con l'acqua, oppure talvolta, a mezzo di un riflettore di forma conica, vengono utilizzate le vibrazioni secondarie del pacco di nichel ha hanno luogo in opposizione, ed in senso normale, alla vibrazione principale.

Non essendovi difficoltà di incollamento, si può avere un elemento trasmettitore dell'ultrasuono diverso da quello ricevitore, ed entrambi sincronizzati sulla stessa frequenza. In fig. 147 è riportato lo schema di un piccolo

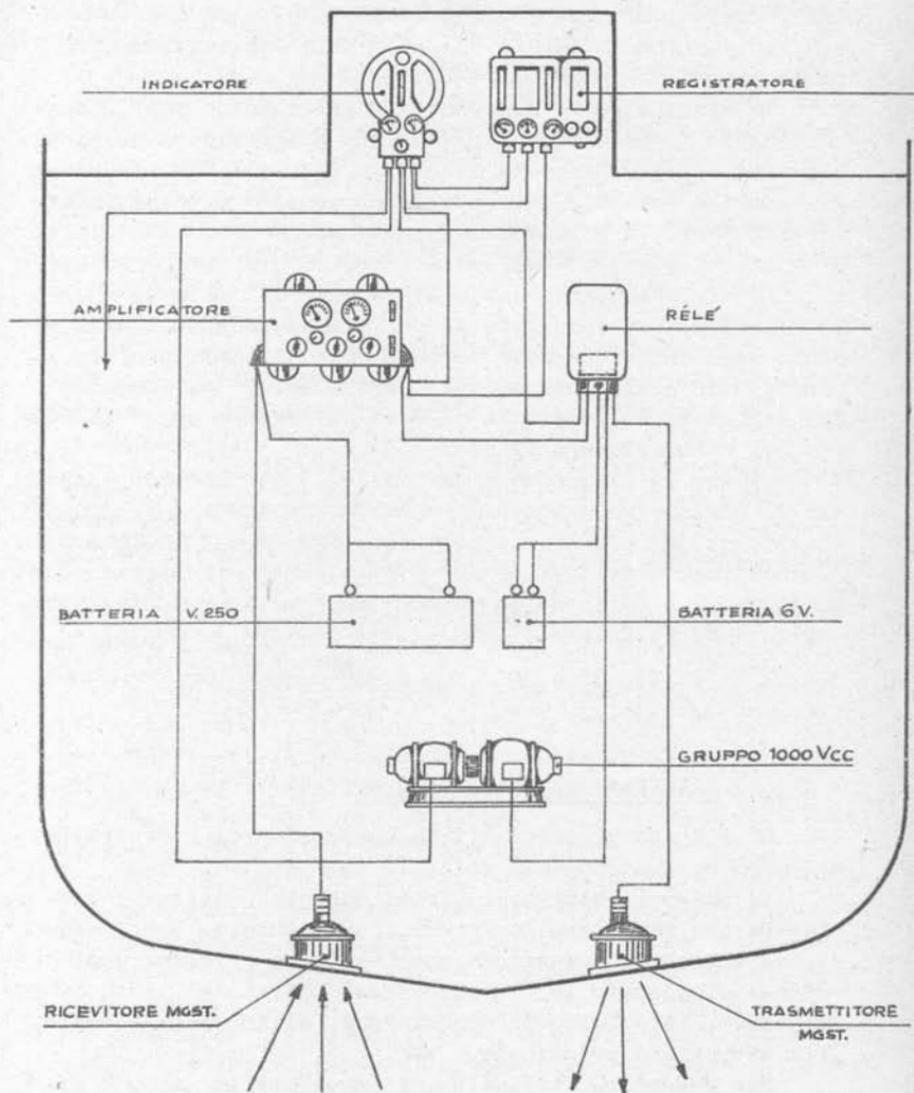


Fig. 146

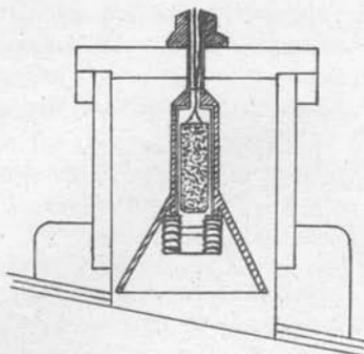


fig. 147

proiettore magnetostrittivo per scandaglio.

L'eccitazione viene effettuata per mezzo di corrente istantanea elevata (circa 200 - 300 A) ottenuta per mezzo della scarica di un condensatore nel modo indicato in fig. 148.

Quando il contatto del commutatore C_m è a sinistra, il condensatore C si carica alla tensione m della batteria B ; quando è a destra, il condensatore si scarica nell'avvolgimento del proiettore magnetostrittivo M_g .

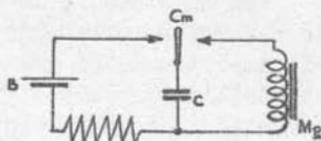


fig. 148

Sotto l'azione di questo campo magnetico impulsivo il materiale emette un treno smorzato di onde ultrasonore che si propagano nel mezzo.

La ricezione viene effettuata da un proiettore identico a quello emittente, e la tensione indotta nell'avvolgimento viene amplificata e rettificata.

Talvolta, specialmente per impianti destinati a servizi idrografici è necessario impiegare, invece all'indicatore luminoso, registratore su striscia in modo da conservare il grafico che dà lo andamento della profondità del mare in corrispondenza della rotta effettuata.

Le portate che si raggiungono con gli scandagli ultrasuoni possono essere di diverse migliaia di metri; in pratica però, a meno che non si tratti di un apparato adatto per rilievi idrografici, interessa conoscere la profondità fino a 500 m. che oggi è il fondale massimo per mine ancorate. In alcuni tipi di registratore vi sono due scale, in corrispondenza a due diverse velocità dell'organo mobile, fino a 125 m. e fino a 725 m.

Il minimo di profondità scandagliabile dipende dalla durata del segnale emesso e dall'inerzia dei singoli organi elettrici e meccanici. Normalmente si può scandagliare fino a 5 e 6 m., ai quali si deve aggiungere la quota del proiettore dal pelo libero per ottenere la profondità del mare. Con speciali accorgimenti in impianti appositamente studiati il minimo scandagliabile può essere fino ad un metro ed anche meno.

Esistono proiettori per imbarcazioni del tutto simili ai proiettori da scandaglio normali e servono al lavoro idrografico in bassissimi fondali. La frequenza di risonanza è assai elevata al fine di ottenere un cono di emissione abbastanza ristretto a scapito della portata che non ha, in questo caso, grande importanza. Il proiettore può essere rigidamente sistemato sull'imbarcazione ed allora, a parte le piccole dimensioni, è identico al proiettore normale da scandaglio; oppure può essere costruito con involucro esterno speciale, in modo da consentire la sistemazione fuori bordo. In questo caso il lavoro di scandaglio deve essere fatto con imbarcazione ferma.

Gli scandagli a magnetostriazione sono, da un punto di vista marinaresco, come si è detto, più pratici degli scandagli piezoelettrici, in quanto la manutenzione risulta più semplice.

In entrambi i tipi le superficie vibranti devono essere assolutamente pulite e non verniciate. Un sottilissimo velo di aria, anche se compreso nella ruggine, diminuisce enormemente l'efficienza del proiettore.

Non si deve mai sottoporre un proiettore piezoelettrico ad urti o ad un rude trattamento; la tensione a cui si può sottoporre non deve mai scorpattare 2000 - 2500 volt. Un indizio dello "scollamento" del proiettore è la variazione della sua frequenza di risonanza, o della sua resistenza equivalente, che può porsi in evidenza rilevando la curva di impedenza anche senza estrarlo dal suo alloggio.

Comunque il significato della parola "scollamento" non è quello del distacco meccanico delle piastre dal cristallo, bensì quello di una discontinuità della pressione e della velocità in corrispondenza delle superfici incollate, che può manifestarsi attraverso qualche lesione nello strato di mastice in conseguenza ad es. di un urto od una sovratensione, che però è insufficiente a dar luogo al distacco delle piastre.

Con personale bene addestrato nelle revisioni e nella manutenzione, lo scandaglio può essere usato molte ore al giorno e per lungo tempo, senza che si debbano lamentare interruzioni durante il suo funzionamento.

o o o o o o

o o o o

o o o

o

Capitolo XVI

E C O G O N I O M E T R I

—oOo—

§ 1) - GENERALITÀ.

Lo stesso principio su cui sono fondati gli scandagli può servire anche per la determinazione di un ostacolo di dimensioni non troppo piccole (scoglio, natante, banco di pesci, od altro) in direzioni del piano orizzontale passante per la zona in cui si trova la nave che effettua la esplorazione.

La ricerca di un ostacolo nel piano orizzontale, intesa a determinare, sia la sua presenza sia la sua distanza dal punto di osservazione, si chiama esplorazione ecogoniometrica; e prende il nome di ecogoniometro (o perite-ro) l'apparecchio col quale questa esplorazione viene effettuata.

L'ecogoniometro è costituito fondamentalmente da un proiettore emittente un fascio ultrasonoro in direzioni del piano orizzontale. Tale proiettore è applicato ad un supporto verticale scorrevole entro un cilindro, che permette di portarlo ad una certa profondità sotto la chiglia in posizione di lavoro, e rientrarlo nello scafo dopo l'uso. L'orientamento dell'asse del fascio ultrasonoro nel piano orizzontale è ottenuto facendo ruotare il supporto sul suo asse verticale.

L'angolo utile di una emissione direttiva, non coincide con quello entro cui sta tutto il lobo principale, ma è minore di esso, con le consuetudini normali si intende per angolo utile dell'emissione direttiva quello per cui la potenza specifica diviene la metà della massima, ossia quello in cui la pressione sonora diviene 0,7 volte la massima.

Con tali convinzioni l'angolo α_u utile di apertura dell'emissione ottenuta di una piastra vibrante è definito dalla relazione (v.fig. 63).

$$\frac{\pi d}{\lambda} \operatorname{sen} \alpha_u = 2,4 \quad ,$$

in cui d è il diametro della piastra e λ la lunghezza d'onda, da cui si ottiene

$$\alpha_u = \operatorname{arcsen} \frac{2,4 \lambda}{\pi d} \quad ,$$

e per minori assai direttive è:

$$\alpha_u \approx \frac{2,4 \lambda}{\pi d} \quad ;$$

e l'angolo solido utile è:

$$\Omega_u = \pi \operatorname{sen}^2 \alpha_u \approx \frac{6}{\pi} \left(\frac{\lambda}{d} \right)^2 \quad ;$$

che, per superficie emittente circolare di area S_e , si

esprime :

$$\Omega_u = \frac{1,56 c^2}{f^2 S_e} \quad . \quad (XI-2)$$

Nella preposizione in spazio libero, è facile calcolare la potenza teorica che viene ricevuta da un elemento ricevente di superficie S_e dovuta alla riflessione su un ostacolo perfettamente riflettente a distanza d , con superficie aventi elementi disordinatamente inclinati, la cui area frontale è S_o (fig.149).

Sia P_e la potenza radiata dall'emettitore di superficie S_e ed Ω l'angolo solido utile. L'angolo solido

$$\omega = \frac{S_o}{d^2} \quad \text{da cui si vede la } S_o \text{ dai punti dell'emettitore.}$$

La potenza P_o che investe l'ostacolo è:

$$P_o = P_e \frac{\omega}{\Omega} \quad ,$$

la quale, per la disordinata inclinazione degli elementi della superficie è reirradiata uniformemente in tutte le direzioni, quindi entro un angolo solido 4π .

La potenza P_r ricevuta dal ricevitore S_r , che è visto da S_o sotto l'angolo $\omega' = S_r / d^2$

$$P_r = \frac{P_o \omega'}{4 \pi} \quad .$$

Sostituendo e ricordando la (XI-2) si ha:

$$P_r = P_e \frac{S_e S_r S_o f^2}{1,54 \cdot 4 \pi e^2 d^4}$$

e, ponendo a c il suo valore in acqua, si ottiene:

$$P_r = P_e \frac{S_e S_r S_o f^2}{19,5 \times 1500 d^4} = \frac{P_e S_e S_r S_o f^2}{29,25 \times 10^3 d^4}$$

Si vede quindi che, la parità di ogni altra condizione la potenza ricevuta è inversamente proporzionata alla quarta potenza della distanza. Inoltre P_r è proporzionale al quadrato della frequenza, cioè a parità di S_e , conviene aumentare la frequenza. Ciò è in realtà illusorio, poiché per avere una costante direttività si fa costante il rapporto d_e/λ , ove d_e è il diametro dell'emettitore e questo equivale ad avere costante il prodotto $S_e f^2$.

Si è qui calcolato il rapporto tra le potenze ricevute e quella emessa per effetto della preparazione nello spazio libero.

Questo rapporto deve essere poi ulteriormente ridotto a causa dell'attenuazione da mezzo (proporzionale al quadrato della frequenza) e della curvatura dei raggi sonori in conseguenza dei gradienti di temperatura e di salinità.

L'apertura del cono entro cui si propaga l'energia ultrasonora può restare lo stesso che per il caso dello scandaglio; ma poiché nell'ecogoniometro, a differenza dello scandaglio, interessano soprattutto le grandi distanze, la attenuazione del suono nell'acqua ha qui una maggiore importanza. Poiché l'attenuazione è proporzionale al quadrato della frequenza, conviene usare per gli ecogoniometri una frequenza più bassa che per gli scandagli. Infatti si usa di solito una frequenza non superiore a 30.000 Hz. Per que-

sto limite per avere ancora la stessa apertura del cono di radiazione occorre avere una superficie radiante maggiore. Se si tratta di proiettori piezoelettrici, con quarzo ancora di 4,5 mm., di spessore, le due piastre di acciaio devono avere uno spessore di 40 mm., ciascuna,

I proiettori magnetostrittivi hanno uno spessore (lineare o radiale) dei pacchi maggiori di quello relativo agli scandagli, con legge inversamente proporzionale alla frequenza.

Per gli ecogoniometri, date le notevoli distanze a cui si vuole eseguire la ricerca e le modeste dimensioni dello organo riflettente, occorre una maggiore potenza acustica rispetto a quella occorrente negli apparati da scandaglio. Perciò invece di un trasmettitore ad impulsi smorzato, si usa sempre un trasmettitore ad onde persistenti.

La potenza specifica emersa in acqua, è in vicinanza del proiettore superiore a quella che determina l'inizio della cavitazione.

§ 2) - Ecogoniometro Piezoelettrico e Magnetostrittivo.

Negli ecogoniometri piezoelettrici, a differenza di quanto avviene negli apparati di scandaglio, il trasmettitore ed il ricevitore, non sono permanentemente collegati al proiettore per l'impossibilità di proteggere il ricevitore durante i periodi di trasmissione, per la maggiore potenza in giuoco. Il collegamento del proiettore al trasmettitore ed al ricevitore è fatto per mezzo del relè di manipolazione e di ascolto; esso funziona anche da manipolatore della corrente anodica dello stadio finale del trasmettitore.

Il rilevamento angolare dell'ostacolo subacqueo si legge e sull'anello graduato di brandeggio del tubo-proiettore, o su apposito ricevitore di indicazione azionato dal trasmettitore a distanza dei rilevamenti.

Il generatore è costituito da un oscillatore a valvola al cui circuito oscillante è accoppiato il proiettore piezoelettrico, a mezzo di un trasformatore, in forte salita.

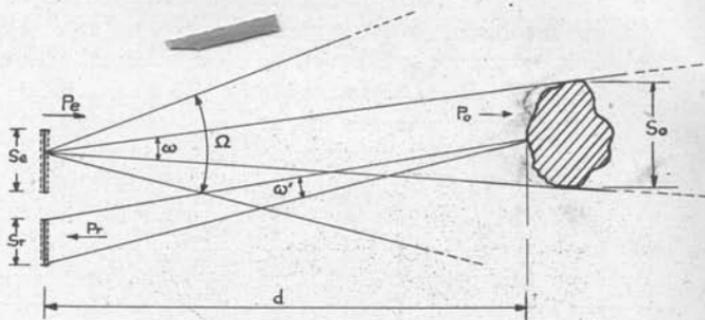


fig. 149

Il proiettore, quando è collegato al ricevitore, è unito direttamente al circuito oscillatorio accordato di griglia della prima valvola; la quale amplifica la d.d.p. sviluppata tra le facce del proiettore quando questi viene in vestito dall'eco di una emissione ultrasonora.

Seguono altri stadi di amplificazione ad alta frequenza e l'ultimo di questi dà una tensione che interferisce quella di un generatore locale in modo da avere una nota acustica di battimenti. La tensione a frequenza acustica viene ulteriormente amplificata, filtrata, ed infine è ricevuta in un telefono. E' bene scegliere la frequenza dell'eterodina in modo che la frequenza dei battimenti sia 1500 ± 3000 Hz., perchè in questo intervallo l'orecchio ha, come noto, la massima sensibilità.

Il rilevatore della distanza dell'ostacolo un tempo era fatto dall'operatore, il quale apprezza l'intervallo di tempo fra l'emissione ed il ritorno d'eco, guardando l'indice di un cronometro che fa un giro completo un $3 \div 4$ secondi, iniziandolo ad ogni emissione di impulso ultrasonoro.

Contemporaneamente all'emissione del treno di onde, il tasto di manipolazione mette in moto anche la lancetta del cronometro per l'apprezzamento dell'intervallo di tempo che separa l'emissione dal ritorno dell'eco.

La manipolazione può essere fatta a macchina, ciò che permette una maggiore regolarità nella trasmissione.

Il sistema piezoelettrico di generazione degli ultrasuoni è, per la praticità di impiego, alquanto inferiore al sistema magnetostrittivo, col quale sono fatti quasi tutti gli impianti più moderni.

Schematicamente l'impianto non cambia molto, ma sostanzialmente diverse sono tutte le particolarità costruttive, elettriche e meccaniche, del proiettore.

Il proiettore è generalmente costituito da un pacco, parallelepipedo o cilindro di lamelle di nichel (o di una lega ad alto tenore di nichel) sul quale sono intrecciate, attraverso scanalature nel pacco stesso poche spire percorse da una forte corrente alla frequenza di risonanza del pacco.

La corrente di alta frequenza, di eccitazione è data da un generatore a valvola al cui circuito accordato è accoppiato a trasformare o ad autotrasformare, in forte discesa, il proiettore magnetostrittivo.

Il ricevitore ultrasonoro magnetostrittivo è costituito in modo analogo all'emettitore, potendo essere tuttavia, come nello scandaglio, completamente distinto da esso. Il circuito elettrico del ricevitore è formato da un certo numero di stadi amplificatori a circuito accordato, e dall'organo indicatore, generalmente ottico.

Sono stati usati talvolta proiettori piezoelettrici dissimmetrici, cioè con il quarzo in mezzzeria rispetto alla massa di acciaio. Questa dissimetria è voluta, sia per rendere più leggera la piastra isolata e di conseguenza per diminuire lo sforzo di taglio a cui il mastice è soggetto, sia per non avere il quarzo ed il mastice in un ventre di pressione e quindi per aumentare la tensione di eccitazione e perciò la potenza, a parità di sollecitazione meccanica del quarzo e del mastice.

I risultati, nei riguardi della ~~risultata~~, non sono stati però molto diversi da quelli ottenuti con normali sandwich simmetrici.

Per avere una buona ricezione occorre che il trasmettitore sia molto bene schermato rispetto al ricevitore, affinché, durante le emissioni, l'operatore non rimanga assordato da un segnale eccessivamente forte, dopo il quale è impossibili riconoscere la presenza di un debole segnale

di eco con la stessa frequenza del segnale di emissione.

Per ottenere buoni risultati, con l'ecogoniometro a ricezione uditiva, la quale, per la grande sensibilità dell'orecchio e il suo enorme potere selettivo da una portata maggiore di quella con indicatore ottico, è necessario che l'emissione del treno di onde ultrasonore sia "appena" percepita dall'operatore o, meglio ancora non percepita affatto.

La ricezione auditiva dell'eco però stanca l'operatore assai rapidamente, mentre ciò non succede nella rivelazione ottica la quale perciò si presta molto meglio per lunghi periodi di lavoro.

Vengono riportati qui in dettaglio le descrizioni di due impianti usati nella Marina Italiana: il SAFAR P 600 ed il GEMA S. tedesco, ed in principio il SONAR americano e l'Asdic inglese.

§ 3) -- Ecogoniometro tipo P 600.

La potenza elettrica istantanea, applicata al sistema magnetostrittivo emittente, del P 600 è di 3 kW. Il rendimento elettromeccanico è $50 \div 60$ %.

Lo stesso nucleo magnetostrittivo funziona come trasmettitore e come ricevitore. Il circuito è disposto in modo tale che il nucleo, sta connesso normalmente al ricevitore e, passa automaticamente a funzionare come trasmettitore quando la camma dell'indicatore chiude il relè trasmissione-ricezione.

La frequenza di risonanza del nucleo è di circa 15300 Hz.

Il nucleo magnetostrittivo è costituito da un pacco toroidale di lamierini di nichel, i quali presentano alla loro periferia dei fori attraverso i quali passa il conduttore, in modo da costituire un avvolgimento tutt'intorno al toroide.

Il pacco, fissato con delle flange su un tubo che serve da supporto, è reso solidale a sua volta, a mezzo di viti, col riflettore troncoconico, il cui asse coincide con quello del pacco.

Il riflettore è ricavato entro la stessa fusione di forma esterna sferica, costituente l'involucro del pacco. La sfera presenta nella parte anteriore una calotta di rame dello stesso diametro del riflettore di piccolo spessore, praticamente trasparente agli ultrasuoni.

La ricezione è possibile per un campo di circa 3500 m attorno alla frequenza media di 15300 Hz.

La sensibilità del sistema ricevente è di 2 μ V per la frequenza centrale della gamma di ricezione per una potenza di uscita di 500 mW. e da luogo all'uscita a 0,07 mW di rumore fondo.

Il nucleo e il riflettore in cui esso è posto, sono disposti in modo da concentrare l'energia emessa entro un angolo di 25° e 30°; la stessa direttività si ha, naturalmente, in ricezione.

Il rilevamento si esegue per "massimo", e si ottiene, con operatore allenato una precisione di circa $\pm 4^\circ$.

La prima valvola del trasmettitore è la valvola pilota, che oscilla a 15300 Hz, con circuito Hartley.

La tensione di placca è stabilizzata da un tubo al neon.

La tensione oscillatoria passa, con accoppiamenti di resistenza e capacità, sulla griglia della valvola amplificatrice in classe A e separatrice, sul cui catodo si ha il sistema di bloccaggio (fig.150).

In condizioni normali questa valvola è portata all'interdizione essendo il catodo reso positivo di una tensione pari alla caduta su R_4 della ripartizione potenziometrica nella serie di R_4 ed R_5 della alimentazione di 250 Volt.

Quando il relè di trasmissione viene chiuso, la tensione di catodo della valvola separatrice assume il suo valore normale ottenuto per sola polarizzazione catodica nella resistenza R_4 , la valvola amplificata, ed il segnale di 15300 Hz si trasferisce, tramite il trasformatore T_1 , alla griglia della valvola prefinale.

La valvola prefinale lavora come amplificatrice in classe C, la tensione negativa di griglia viene fornita attraverso un apposito alimentatore, la tensione di placca viene fornita dalle cassette di condensatori caricate a loro volta
PAOLINI - Acustica ed Elettroacustica..... 43

dall'alimentatore di alta tensione.

La tensione negativa di griglia alle valvole finali viene fornita dall'alimentatore apposito, attraverso il quinto morsetto.

Il segnale passa dalla ultima valvola tramite il trasformatore T_2 , con primario accordato, sulle griglie delle 6 valvole collegate in parallelo e funzionanti in classe C, come la prefinale.

Il segnale, così amplificato, viene applicato al nucleo magnetostrittivo tramite il trasformatore T_3 .

Questo trasformatore ha il primario accordato in parallelo mentre il secondario connesso al nucleo magnetostrittivo è accordato in serie; la capacità di accordo C serve anche come capacità di blocco per la corrente continua I_P necessaria per la polarizzazione del nucleo.

La corrente di placca dei tubi prefinale e dei finali viene fornita dai condensatori solo quando sulla griglia del tubo prefinale arriva un segnale. Tali correnti variano nel tempo perchè la tensione anodica varia con la legge di scarica dei condensatori.

Il trasmettitore è alimentato da un gruppo convertitore 220 V. 50 Hz, a sua volta alimentato dalla rete a.c.c. di bordo.

L'amplificatore di ricezione è a cambiamento di frequenza con una amplificazione totale di 140 decibel (fig. 151).

Il primo stadio è accordato alla frequenza del nucleo ricevitore e la banda di lavoro è di 3500 Hz, cioè assai stretta in modo da eliminare una parte dei disturbi; l'amplificazione è di 32 dB.

Il secondo stadio è a resistenza e capacità e amplifica circa 36 dB.

I segnali così amplificati vengono applicati alla griglia della mescolatrice la cui parte triodo oscilla stabilmente su di una frequenza leggermente diversa da quella propria del nucleo magnetostrittivo, in modo da ottenere un battimento a frequenza acustica.

Il battimento viene amplificato a sua volta, da uno stadio a resistenza e capacità, di circa 15 dB, di amplificazione. In questo circuito si ha un filtro passa-basso per bloccare le componenti della frequenza dell'oscillatore locale.

Sulla griglia della rettificatrice vi è un commutatore che include ed esclude un dispositivo rettificatore ottenuto utilizzando le due placchette della valvola.

Sulla placca della rettificazione triodo-doppio diodo vi è un trasformatore con due secondari, uno dei quali porta il segnale alle cuffie e l'altro alla griglia del tubo a gas. L'amplificazione di questo stadio è di circa 25 dB.

Il tubo a gas ha normalmente una polarizzazione di griglia da portarlo a lavorare in un punto prossimo all'innescò. Quando arriva il segnale sulla griglia, questa diventa meno negativa, la valvola s'innescò e circola una certa corrente nel tubo a gas.

Tale corrente dura un istante brevissimo perchè il tubo si disinnesca immediatamente e il tempo di durata dell'innescò dipende dai valori della capacità e della resistenza fra loro in parallelo, ed in serie al circuito di placca.

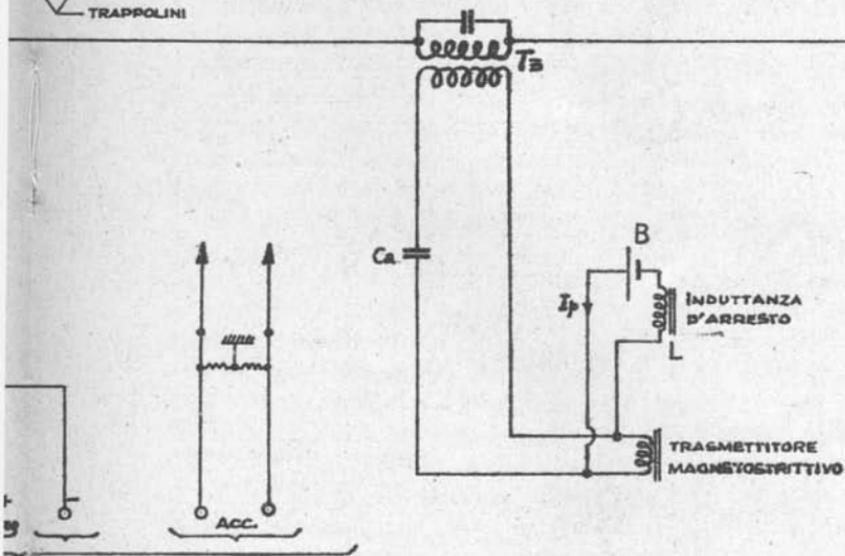
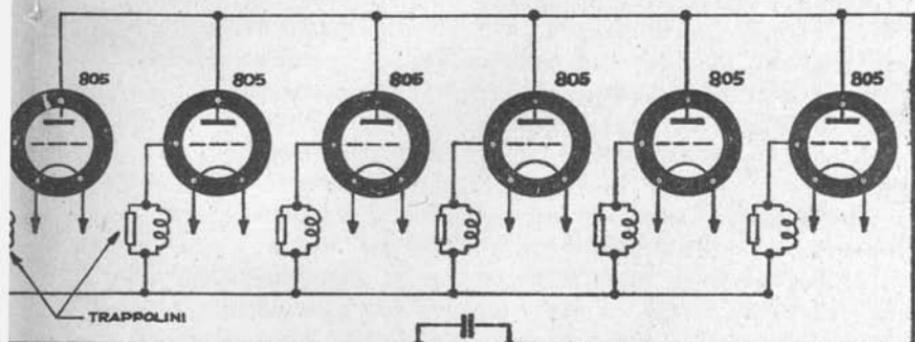
Nel circuito di placca vi è una resistenza che limita il picco di corrente che passa nel primario del trasformatore il cui secondario alimenta le lampade al neon poste dell'indicatore ottico.

Il commutatore eco-ascolto serve a escludere la valvola a gas quando, interrompendo contemporaneamente il funzionamento del trasmettitore, si voglia far funzionare lo impianto come ricevitore di rumori, cioè come impianto idrofónico per ultrasuoni.

Inoltre, si ha un relè che serve a cortocircuitare le cuffie e il primario del trasformatore della valvola a gas, quando viene emesso il segnale col tasto, o con meccanismo comandato dall'indicatore ottico allorchè passa per una determinata posizione. Il relè di corto-circuito delle cuffie viene chiuso quando il relè trasmissione-ricezione passa in posizione trasmissione.

L'amplificatore del ricevitore è munito di un regolatore di sensibilità e di uno di volume.

Il relè di trasmissione-ricezione viene comandato attraverso le camme dell'indicatore oppure attraverso il tasto.



TRASMETTITORE

CONDENSATORI
ARICI

La commutazione è di breve durata, perchè dopo pochi millisecondi il relè deve riprendere la posizione di riposo, dato che il segnale emesso è brevissimo.

Il relè trasmissione-ricezione viene eccitato con 110 V attraverso una resistenza limitatrice. L'avvolgimento è costituito da due induttanze in serie fra loro, di cui una viene inclusa nell'istante successivo, al distacco del relè, tramite un contatto ausiliario, per rendere più rapido il funzionamento del relè stesso.

L'induttanza, a nucleo di ferro L, ha l'ufficio di evitare che la corrente a frequenza ultracustica venga cortocircuitata attraverso l'enorme capacità della batteria B di eccitazione del nucleo (fig.151).

L'indicatore è costituito da due dischi girevoli a diversa velocità, ciascuno portante una piccola lampada al neon. Un apposito commutatore include l'una o l'altra lampada al secondario del trasformatore posto sulla placca della valvola a gas dell'amplificatore.

Nel medesimo tempo in cui si commutano le lampade al neon, si commutano anche le camme, in modo che l'emissione viene fatta ogni 6,66 secondi nel caso della scala 5000 m., oppure ogni 2,67 secondi per la scala 2000 m.

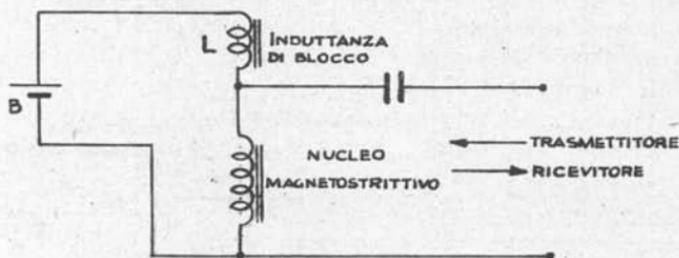


fig.151

Un secondo commutatore serve a far funzionare l'impianto automaticamente oppure no, secondochè si trova in condi-

zioni di emissione data dalle camme, oppure in condizione di emissione data dal tasto.

L'impianto "a scafo" è costituito da una colonna che viene applicata ad un apposito cassonetto fissato allo scafo, il quale accoglie la sfera, con calotta anteriore molto sottile e quindi trasparente all'ultrasuono, contenente il nucleo emittente-ricevente.

Con proiettore estratto l'unità può navigare solo a una velocità oraria massima di 15 miglia, onde evitare che il complesso venga fortemente sollecitato.

L'albero girevole del proiettore può compiere una rotazione massima di 400°, dopo di che si ha un arresto per evitare che procedendo sempre nello stesso senso si abbia a danneggiare il cavo di connessione al nucleo.

Le portate sono quanto mai variabili con diversi parametri, quali la stratificazione dell'acqua, la temperatura, la presenza di foci di fiumi nelle vicinanze, le dimensioni dell'ostacolo, la velocità relative, ecc.. Tuttavia è da tener presente che talvolta i cattivi risultati sono più dovuti a difetti di impianto e di allenamento del personale, piuttosto che a cause fisiche esterne.

Le portate sicure per la rivelazione di un sommergibile in immersione, con un ecogoniometro funzionante regolarmente, sono 2000-2500 m; generalmente si arriva a fare rilevamenti a distanze maggiori fino a circa 4000 m. ed oltre se non interviene qualche circostanza sfavorevole.

Per portate minime, dell'ordine di 100 e 300 m. l'unità di superficie che attacchi un sommergibile può facilmente perderne il contatto, sia perchè l'eco è molto vicino alla emissione, sia perchè l'ostacolo si trova generalmente in direzione assai inclinata sull'orizzontale. Le operazioni di avvicinamento affidate al comando dell'unità, pur confermando questo, per ora insopprimibile, difetto tecnico, tendono con vari accorgimenti, a contenere tale inconveniente.

4) - Ecogoniometro Tipe S.

Questo impianto ecogoniometro, già in dotazione alla Marina tedesca, costituisce una realizzazione molto complessa e curata, per quanto concettualmente poco diversa dalle altre.

La caratteristica di questo impianto è la notevole precisione con cui si può determinare la direzione in cui si trova l'ostacolo, e l'automatizzazione delle operazioni di ricerca. Con questo impianto la tecnica della ecogoniometria è stata spinta ai limiti determinati dalle sole caratteristiche di propagazione sonora in acqua. Per contro lo impianto ha circuiti assai complicati, e, se l'automatismo di tutte le operazioni ha un lato contribuito alla uniformità della ricerca ecogoniometrica, prescindendo al massimo delle attitudini personali degli operatori, ha però, dall'altro lato aumentato la probabilità di guasti o di sregolazioni.

Il treno ultrasonoro è generato da un emettitore a più elementi magnetostrittivi i quali hanno spiccate proprietà direttive, ed alla ricezione per determinare la direzione di propagazione con grande precisione la base ultrasonora ricevente viene usata sfruttando le differenze di fase con cui l'onda ultrasonora investe gli elementi,

L'organo rivelatore dell'effettuata compensazione, è ottico.

L'impianto ecogoniometro è costituito dalle seguenti parti essenziali, indicate schematicamente nella tavola seguente (fig. f.t.): generatore A/B, cassetta di ricezione Bg, pannello indicatore G/H, pannello da commutazione J/K, parte a l capo C/F.

Pannello generatore A/B - Il pannello serve per la generazione dell'impulso a corrente alternata a 15 KHz. La potenza massima erogata è di 3 Kw. Il pannello contiene l'oscillatore di alta frequenza, con l'alimentazione delle correnti continue ed i condensatori che, ed i raddrizzatori per carichi, forniscono le tensioni anodica e di griglia schermo ai due tubi oscillatori in contro fase.

Cassetta d'inserzione Bg - Costituisce l'organo di collegamento fra l'oscillatore e i traduttori elettroacustici; esso consente la regolazione della potenza elettrici;

ca applicata a questi ultimi ai tre valori: 3 Kw, 0,3 Kw.

Pannello indicatore G/H - contiene due amplificatori uguali (gemelli) il relativo alimentatore con il raddrizzatore per la tensione a 12 Volt di alimentazione dei relè di commutazione della base elettroacustica.

Nella parte superiore di questo pannello si trova il tubo di Braun con il relativo alimentatore ed il sistema indicatore a specchio ruotante. Inoltre in questa parte trovano posto l'interruttore principale, il regolatore di sensibilità ed il commutatore per le due scale di distanza.

Pannello di commutazione J/K: Fornisce la corrente continua per la magnetizzazione permanente della base elettroacustica e contiene i relè di commutazione di essa in ricezione o trasmissione.

Parte a scafo C/F: sopporta la base elettroacustica costituita dal pacco di nichel, la quale deve brandeggiarsi ed inoltre, per esigenze d'impiego, rientrare e fuoriuscire. La parte a scafo pertanto è dotata di manovra di brandeggio e di sollevamento. La costruzione della parte a scafo viene fatta in tre tipi diversi:

- tipo per navi di superficie con comando di brandeggio e di sollevamento sul posto;
- tipo per sommergibile, modificato per comando di brandeggio e sollevamento sul posto;
- tipo per sommergibile con comando di brandeggio e sollevamento a distanza.

Per il funzionamento dell'ecogoniometro occorre una tensione alternata di 220 V, 50 Hz, e circa 0,9 KVA di valore medio. La frequenza deve essere mantenuta costante entro i limiti $\pm 1\%$; la tensione entro i limiti $\pm 2\%$. L'impianto non può essere alimentato con una tensione superiore a 250 V perchè altrimenti si possono verificare danneggiamenti ai vari raddrizzatori a secco contenuti nei pannelli.

Le oscillazioni a 15.000 Hz vengono generate da due pentodi collegati in controfase.

Il funzionamento del sistema elettrico trasmettitore è diviso in due tempi:

- il tempo di oscillazione dell'oscillatore (durata 20 msec.);
- il tempo di accumulazione di energia dalla rete di alimentazione, energia che successivamente viene, parzialmente, trasformata in energia oscillatoria.

Nella tavola separata è indicato lo schema elettrico del trasmettitore. Il controllo dell'inizio dell'impulso e della sua durata viene fatta mediante due relè: i contatti a_1 ed a_2 di uno di questi relè, sono ad azione pronta e stabiliscono l'inizio dell'oscillazione, mentre (contatti V_1 e V_2 del secondo relè sono ad azione ritardata (20 msec) e determinano la fine dell'oscillazione.

a) - Prima dell'impulso (fig.153 a). Il condensatore C_1 viene caricato dal trasformatore T_1 a mezzo dei raddrizzatori r_1 e r_2 . Parimenti il condensatore C_2 viene caricato tramite i raddrizzatori r_2 e r_3 . Non essendo innescato lo spinterometro S_1 , ai capi di raddrizzatore r_3 si ha una trascurabile differenza di potenziale, quindi gli schermi dei due tubi oscillatori O_1, O_2 si trovano praticamente a tensione zero. Agli anodi dei tubi è invece applicata la tensione del condensatore C_1 attraverso il trasformatore di uscita T_2 , ma non ha valore sufficiente da provocare apprezzabile corrente anodica.

b) - Durante l'impulso (fig.153 b). All'istante dell'inizio dello impulso lo spinterometro S_1 (fig.153) viene innescato dalla presenza di un impulso di tensione nel secondario del trasformatore T_3 , generatore della chiusura del contatto a_1 del relè r_1 .

Attraverso la scintilla i due condensatori C_1 e C_2 vengono collegati in serie, in modo che la tensione anodica viene ad essere data dalla somma delle tensioni dei due condensatori.

Il raddrizzatore r_3 , dato il senso del raddrizzamento, nella fase di carica dei condensatori permette il passaggio di una semionda della corrente di carica, mentre in questa fase evita la scarica diretta del condensatore C_2 , che altrimenti potrebbe avvenire nel circuito costituito dalla scintilla S_1 , ora innescata, e dal secondario del trasformatore T_3 .

Attraverso la scintilla dello spinterometro gli schermi vengono collegati all'armatura positiva del condensatore C_2 .

In queste condizioni, cioè con elevata tensione anodica, somma di quelle del condensatore C_1 e del condensatore C_2 , e con la presenza della tensione di griglia schermo, data dal condensatore C_2 , ha luogo il passaggio di corrente anodica.

La tensione anodica, per la durata dell'impulso, diminuisce per effetto della scarica dei condensatori (fig. 154), ma ciò ha relativamente poca importanza trattandosi di pentodi.

La tensione applicata agli schermi praticamente non diminuisce, nonostante la scarica del condensatore C_2 . Ciò è dovuto alla presenza, nel circuito di schermo del sistema costituito dall'induttanza L_1 e dalla resistenza R_1 in parallelo. Questo sistema costituisce una notevole impedenza appena tenta di stabilirsi il passaggio della corrente di schermo, poichè si è ancora in fenomeno di correnti variabili. Con lo stabilizzarsi della corrente di schermo diminuisce la caduta di tensione sul circuito L_1 ed R_1 di schermo.

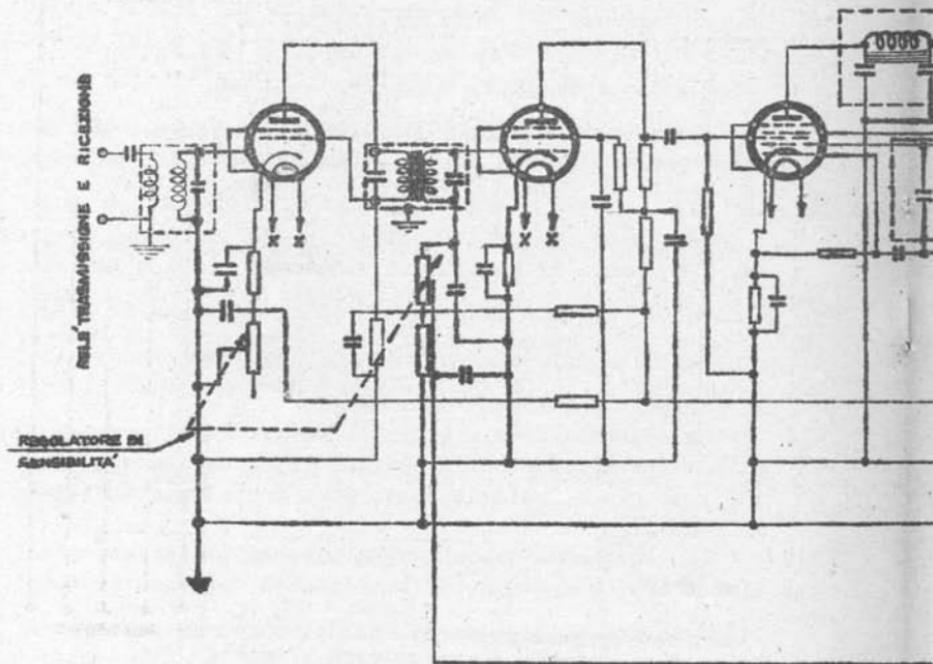


fig. 15

Pertanto, mentre la tensione del condensatore C_2 diminuisce la tensione di schermo aumenta leggermente .

Tale aumento della tensione di schermo compensa la diminuzione della tensione anodica, per cui l'ampiezza del segnale all'uscita, per tutta la durata dell'impulso, resta costante.

c) - Finito l'impulso, a causa del cortocircuito operato dal relè V_1 nel circuito oscillatore, viene bloccato il passaggio della corrente anodica e di quella di schermo, e si spegne la scintilla in S_1 . I condensatori C_1 e C_2 vengono di nuovo ricaricati in parallelo, come descritto al comma a).

Prima dell'impulso il trasformatore T alimentato dalla rete, carica a 300 V circa il condensatore C_4 attraverso il raddrizzatore r_4 e la resistenza R_2 ; pure a 300 V il condensatore C_5 attraverso lo stesso raddrizzatore r_4 e le resistenze R_2 e R_3 ; ed a 150 V circa il condensatore C_6 tramite ancora il raddrizzatore r_4 , la resistenza R_2 , R_3 ed il partitore costituito dal raddrizzatore r_5 e dal resistore R_4 , il quale ha circa la stessa resistenza del raddrizzatore.

In queste condizioni la tensione di griglia dei tubi oscillatori, è data dalla risultante delle due tensioni in opposizione dei condensatori C_5 e C_6 , cioè 150 V negativi. Questo valore consente l'innesco, appena le tensioni di placca e di schermo assumono i valori opportuni.

Sempre prima dell'impulso, il condensatore C_2 è carico a 2000 V, e il condensatore C_1 a 3300 V.

All'inizio dell'impulso, si chiude a_1 e si apre a_2 . Il condensatore C_4 si scarica sul primario del trasformatore T_3 , lo spinterometro scintilla, la tensione delle

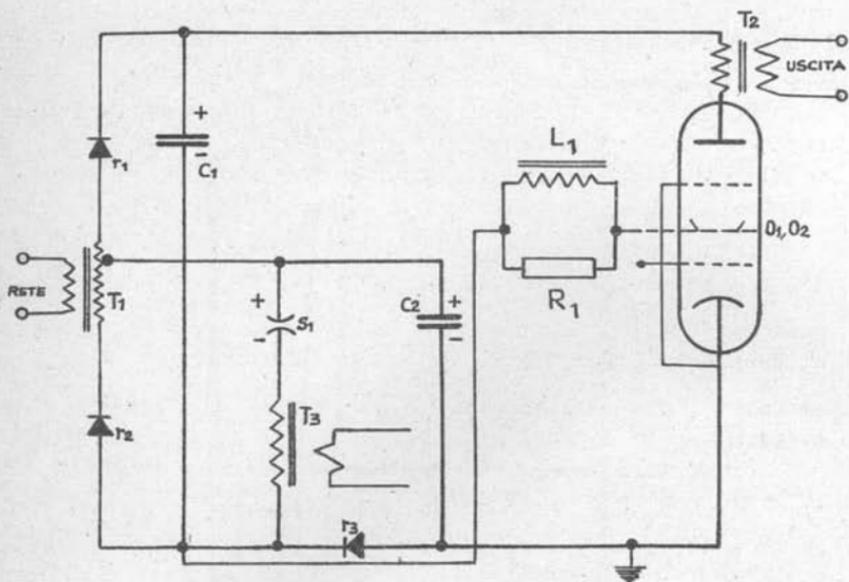


fig.153 a) - Prima dell'impulso .

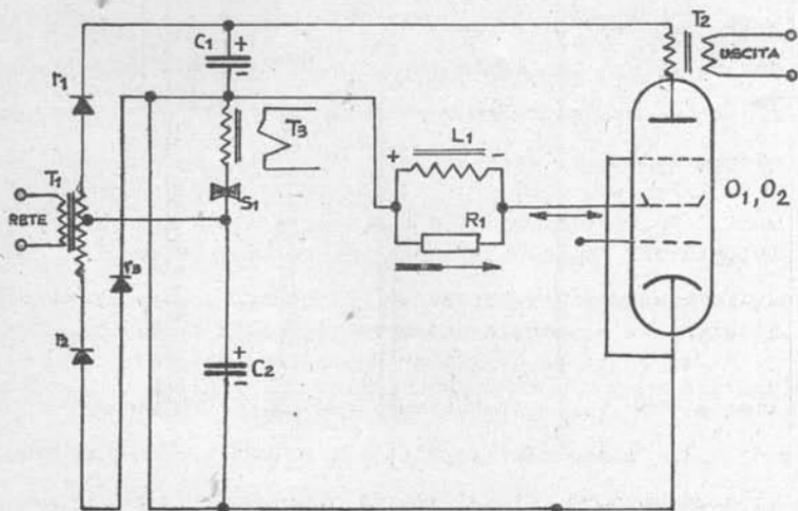


fig. 153 b) - durante l'impulso .

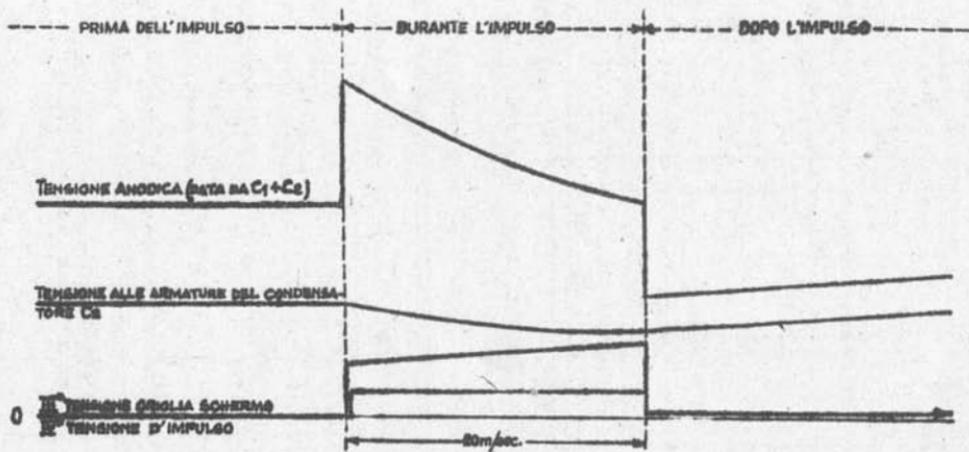


fig.154

placche diviene così 5300 V e quella degli schermi 2000 V; e le oscillazioni si innescano.

In regime di oscillazioni la tensione di griglia, per effetto della componente alternativa, che si produce al secondario del trasformatore T_5 , assume valori positivi, per cui si verifica ad ogni semionda positiva della tensione di griglia un impulso di corrente nel circuito di griglia stesso. Gli elettroni fluiscono attraverso il secondario del trasformatore T_5 e, non potendosi scaricare attraverso la resistenza R_4 , che ora risulta "appesa" per effetto dell'apertura del contatto a_2 , annullano la carica del condensatore C_6 ed aumentano quella del condensatore C_5 , dati i segni delle tensioni preesistenti alle armature di questi condensatori.

La tensione del condensatore C_6 non può mai invertirsi, data la presenza del raddrizzatore r_5 in parallelo ad esso, perciò quando il condensatore C_6 ha raggiunto la tensione zero, la corrente circola soltanto attraverso il raddrizzatore r_5 e continuerebbe a caricare il condensatore C_5 .

In parallelo a C_5 sussiste però sempre il circuito di scarica costituito dalla resistenza R_3 e dal primario del trasformatore di innesco T_3 . La presenza di tale circuito di scarica livella il valore massimo di tensione che può raggiungere il condensatore C_5 , poichè, aumentando la tensione di questo, aumenta anche la corrente di scarica, attraverso R_3 : ad un certo punto la corrente di carica eguaglia quella di scarica ed allora la tensione di C_5 non aumenta più. Questo stato di equilibrio corrisponde ad una tensione di 500 V che, essendo ora nulla la tensione di C_6 , è anche la tensione di polarizzazione di griglia.

Con tale valore di polarizzazione di griglia le oscillazioni, già innescate vengono mantenute, ad un livello compatibile con la potenza dissipata ammissibile nei tubi elettronici.

La tensione anodica si è frattanto abbassata fino a circa 3000 V (ma trattandosi di pentodi cioè non ha molta importanza) e la tensione di schermo è 1200 V.

Cessato il regime di oscillazione, i tubi si trovano con tali valori di tensione sotto il punto d'interdizione, quindi la corrente anodica diventa zero. La scintilla dello spinterometro S_1 può ancora restare innescata, per effetto della tensione alternativa ad essa applicata dal secondario del trasformatore T_1 , e cioè fino a quando il valore di detta tensione non passi per lo zero. Questo ulteriore funzionamento dello spinterometro può, nel caso più sfavorevole durare un periodo della corrente alternata di alimentazione, cioè 10 msec.. In questa fase, ad ogni modo, la elevata tensione negativa di polarizzazione di griglia assicura che la corrente anodica resti nulla.

Trascorsi i 20 msec. si apre il contatto V_2 , quindi si apre il circuito di livellamento della tensione del condensatore C_5 .

Con un sistema, che viene qui sotto descritto, si bloccano anche le oscillazioni dei tubi elettronici, quindi si annulla la corrente di griglia. La tensione del condensatore C_5 si mantiene dapprima sui 500 V, scaricandosi poi lentamente sulla dispersione propria.

Questa fase dura circa $1/7$ dell'intervallo fra due impulsi; successivamente si ripassa alla fase prima dell'impulso, già descritta.

Il circuito oscillatorio anodico è accoppiato tramite il trasformatore T_2 alla cassetta d'inserzione Bg e questa agli elementi magnetostrittivi della parte a scafo.

Il trasformatore T_2 ha lo scopo di adeguare la bassa impedenza di entrata degli elementi elettroacustici (alla loro risonanza 65 ohm) alla elevata impedenza interna dei tubi elettronici oscillatori.

Gli elementi magnetostrittivi trasmettenti-riceventi sono costituiti da 2 pacchi (o 2 insieme di pacchi) di lamierini di nichel ossidato, disposti frontalmente sullo stesso piano verticale. Quando l'eco dell'onda ultrasonora investe i gruppi riceventi, si generano nei due pacchi due f.e.m. di uguale andamento, e che hanno anche la stessa fase solo quando il piano frontale dei pacchi è normale alla direzione di provenienza dell'ultrasuono. Queste due f.e.m. devono essere amplificate e confrontate.

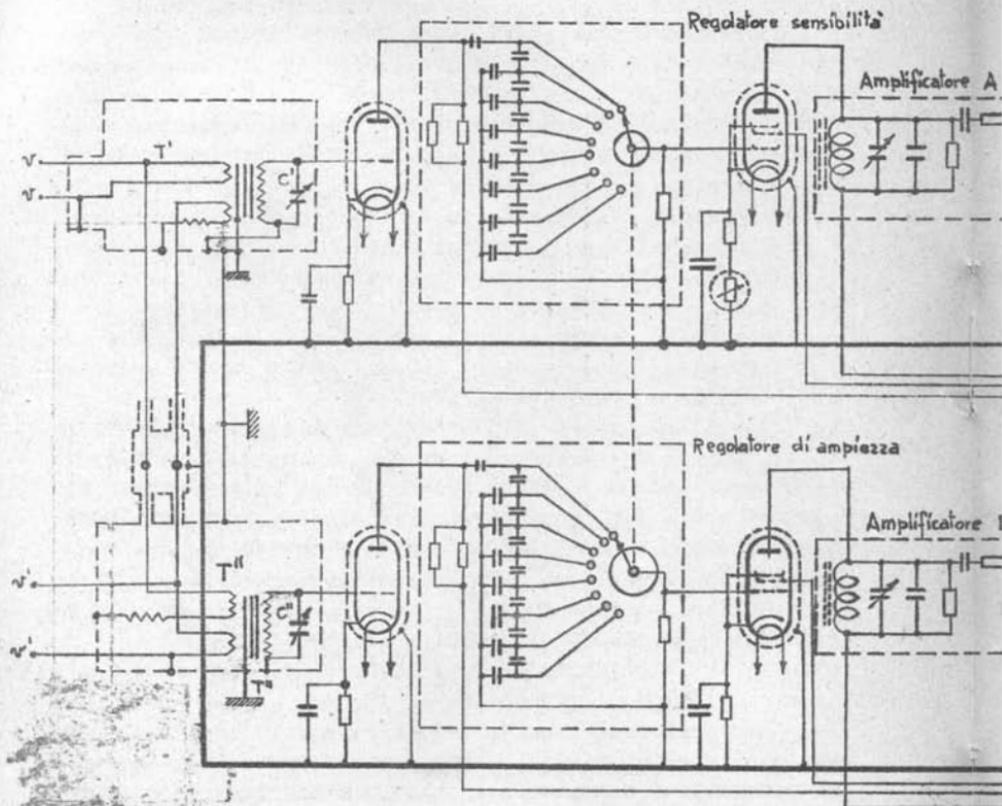
Ciò viene fatto a mezzo delle apparecchiature riceventi contenute nel pannello G/H, costituite da due amplificatori di tensione uguali di circa 140 dB, da sistemi sfasatori, e da un dispositivo oscillografico che permette di constatare quando i due echi ricevuti dai due pacchi magnetostrittivi riceventi sono in esatta concordanza di fase.

Il pannello G/H contiene quindi i due amplificatori gemelli (fig.155) ed il relativo alimentatore. Ciascun amplificatore è costituito da 4 stadi. Le due tensioni a e b dovute all'eco, vengono applicate, tramite il pannello J/K, a trasformatori. Le tensioni di uscita dai pacchi magnetostrittivi sono applicate ai punti u e v e u' e v' dei due trasformatori (T') e (T'') dei due amplificatori gemelli. Questi due trasformatori sono a doppio avvolgimento primario e vengono collegati in modo che al secondario di essi si abbia nell'un caso, una tensione proporzionale ad a-b (trasformatore di "differenza") e nell'altro una tensione proporzionale ad a+b (trasformatore di "somma").

Queste tensioni vengono applicate alle griglie dei primi stadi di amplificazione. I condensatori variabili C' e C'' servono per l'accordo dei secondari dei trasformatori sulla frequenza di 15 kHz.

La tensione di uscita dal primo stadio amplificatore può venire regolata mediante un potenziometro regolatore di sensibilità a capacità ad otto scatti. Ognuno corrisponde ad un rapporto di riduzione costante ed uguale a 1:3,5.

Secondo l'ipotesi fatta per l'ampiezza delle tensioni a e b siano uguali, (e se non lo sono si possono riportare od essere con semplici artifici), le tensioni somma (a + b) e differenza (a - b) trovansi sempre in quadratura fra di loro.



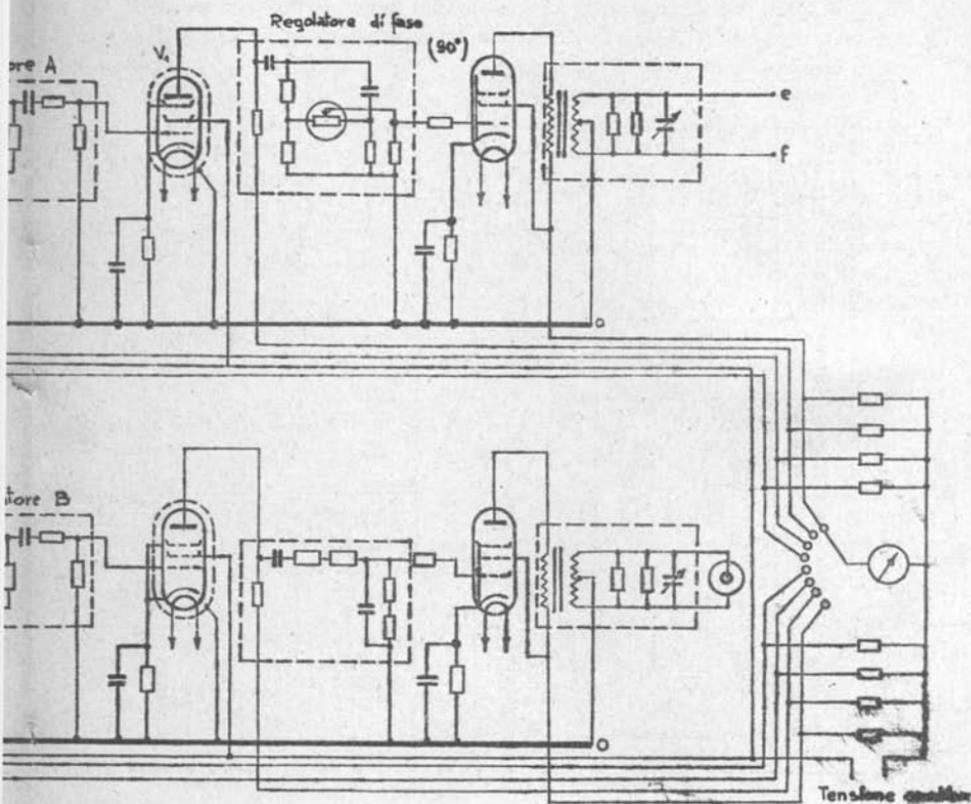


fig. 155

Il quadripolo inserito sull'anodo del tubo V_1 genera uno sfasamento di 90° della tensione somma, in modo che alla entrata dell'ultimo stadio di amplificazione le tensioni dei due amplificatori gemelli sono in fase fra loro. Saranno dunque anche in fase le tensioni applicate alle due coppie di placche del tubo di Braun proporzionali alle tensioni di uscita dei due amplificatori gemelli.

Se fra le due tensioni a e b non si ha alcun sfasamento, cioè la base è centrata rispetto all'ostacolo, la tensione $a-b$, è uguale a zero.

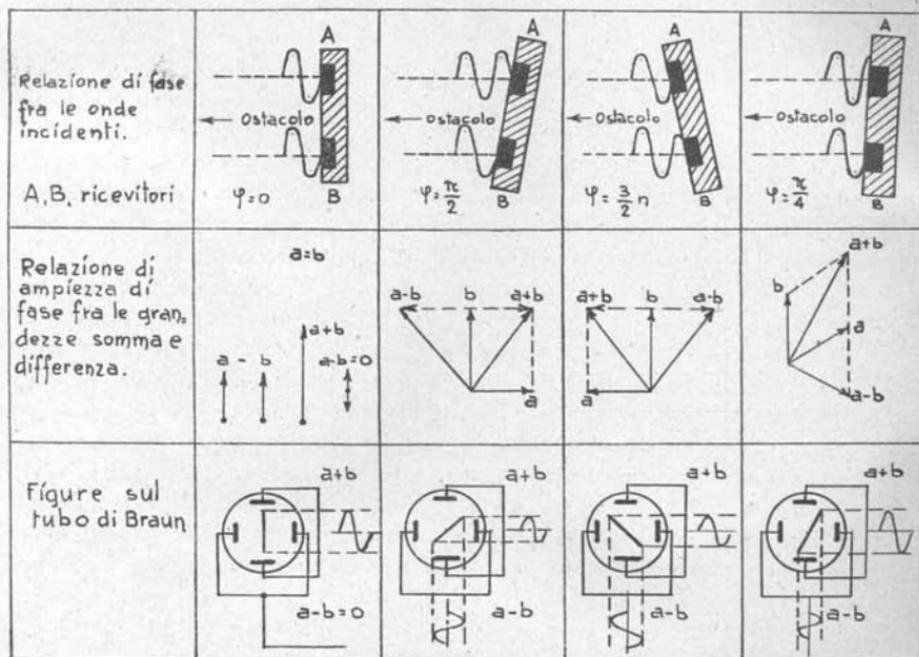


fig.156

In queste condizioni il segmento luminoso, ottenuto dal moto del punto luminoso, che individua la presenza dell'eco sul tubo di Braun, compare verticale sulla scala.

Se la base elettroacustica è ruotata

verso destra, rispetto a quella del caso precedente, ed in misura tale che lo sfasamento delle due tensioni a e b sia 90° (fig. 156) le tensioni somma ($a + b$) e differenza ($a - b$) hanno uguale ampiezza. Il segmento, indicatore di eco, compare dunque in questo caso inclinato di 45° sulla scala.

Se la posizione della base elettroacustica è ruotata verso sinistra e della stessa misura di cui nel caso precedente era ruotata verso destra, si ottiene uno sfasamento tra le tensioni ($a + b$) ed ($a - b$) di $n/2$, mentre le ampiezze di dette tensioni sono ancora eguali fra di loro. Il segmento indicatore d'eco risulta in questo caso inclinato ancora di $\pi/4$, però dalla parte opposta rispetto al caso precedente.

Per una posizione intermedia rispetto ad una qualunque delle tre sopra esaminate, si ha uno sfasamento fra le tensioni di somma ($a + b$) e differenza ($a - b$) inferiore a $\pi/2$ (in valore assoluto), allora il segmento indicatore sarà inclinato di un angolo inferiore a 45° e verso destra oppure verso sinistra a seconda dell'orientamento della base rispetto alla direzione del rilevamento.

Per lo sfasamento di π fra le tensioni a e b si ha l'annullamento della somma ($a + b$), cioè il caso opposto a quello della base elettroacustica disposta perpendicolarmente alla direzione di provenienza dell'eco; perciò il segmento indicatore di eco è disposto orizzontalmente.

Il segmento luminoso che in genere compare sul tubo oscillografico viene riflesso da uno specchio circolare e successivamente da uno specchio piano. Questo ultimo ha un moto angolare a denti di sega attorno ad un asse giacente nel suo stesso piano, ed in tal maniera il segmento luminoso viene proiettato sulla scala graduata semitrasparente.

Le camme che comandano gli interruttori ed il moto dello specchio sono regolate così da dar luogo all'impulso di emissione allorché lo specchio è all'inizio della corsa di andata (lenta). La corsa dal punto luminoso del tubo oscillografico riflesso nella scala graduata è mascherata da uno schermo, mentre è ben visibile il tratto luminoso variamente dovuto all'eco. L'operatore, allorché nota la presenza di un'eco, deve brandeggiare il supporto contenente gli e-

lementi magnetostrittivi, fino a portare il segmento verticale. In questa posizione il piano frontale della base è normale alla direzione in cui si trova l'ostacolo.

Le scale, graduate in ettometri, sono due, una corrispondente ad una portata massima di 2 Km. e l'altra di 4 Km. alle quali corrispondono due diverse cadenze : 3,15 e 6,8 sec..

Il pannello J/K contiene il raddrizzatore per la corrente di magnetizzazione della base e la serie di relè per la sua commutazione trasmissione-ricezione.

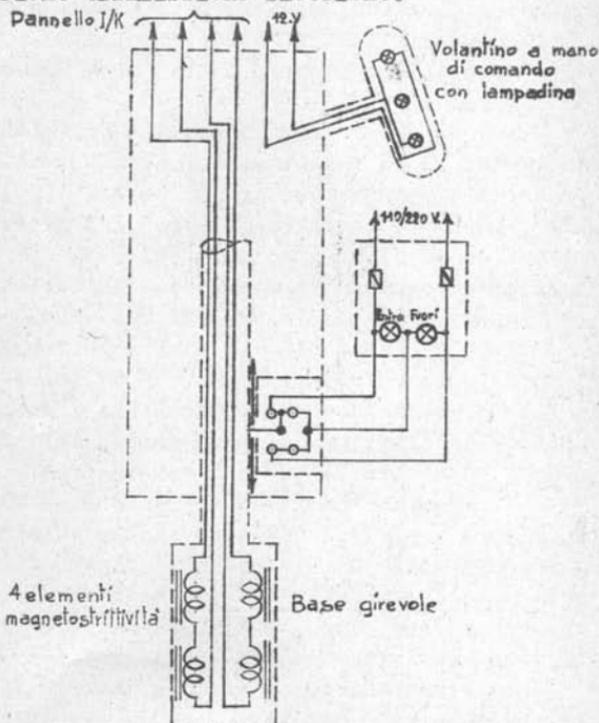


fig. 157

La corrente di magnetizzazione di 6 e 8 A. viene fornita da un raddrizzatore, e filtrata molto accuratamente con induttanze e condensatori elettrolitici.

La tensione applicata agli avvolgimenti della base ma-

gnetostrittivo è circa 5 e 6 V. Il valore di tale corrente viene regolato con la resistenza a cursore e controllato da uno strumento.

Il relè A-B di commutazione trasmissione-ricezione sono con contatti nel vuoto.

Gli elementi magnetostrittivi trasmettenti-riceventi sono del tipo già descritto a proposito dei generatori ultrasonori, ma possono differire nel sistema di movimento a seconda che sia per unità di superficie o per sommergibile.

La base elettroacustica è, come si è già accennato, costituita da due o quattro elementi magnetostrittivi (fig. 157). Ogni elemento consiste in un pacco di lamierini di nichel con fronte rettangolare alta 15 o 30 cm; larga 4 cm. Gli elementi sulla stessa verticale, quando sono due, sono elettricamente in serie fra loro. Gli elementi sulla stessa orizzontale sono del tutto separati e costituiscono i due differenti ricevitori di cui si è parlato.

La distanza fra gli assi verticali di due pacchi contigui è ovviamente $\lambda/2$ cioè 5 cm.

Il brandeggio della "base elettroacustica" è di $\pm 270^\circ$ a mezzo di volante a mano, o con motore. Una scala disposta alla estremità superiore del tubo di rientro permette di controllare l'orientamento della base. Un sistema di trasmissione elettrico aziona un ricevitore di brandeggio sistemato in un qualsiasi punto del bastimento.

La base può fuoriuscire e rientrare ed è provvista di organi di segnalazione (lampade spia) e di sicurezza (arresti automatici) che ne regolano il funzionamento meccanico.

Nella tavola fuori testo è riportato lo schema funzionale completo dell'impianto, che permette di riconoscere sinteticamente la funzione delle varie parti.

L'impianto S, che è stato largamente usato anche nella Marina Italiana, costituisce uno dei più moderni e completi impianti ecogoniometrici esistenti, e dà con personale addestrato il massimo di attendibilità dei risultati. Tuttavia esso non è corredato da tavolo previsore di lancio, come invece normalmente si ha per gli impianti

A S D I C (inglese) e S O N A R (americano), i quali peraltro non conseguono portate e precisione superiore a quella ottenibile con l'impianto qui sopra descritto.

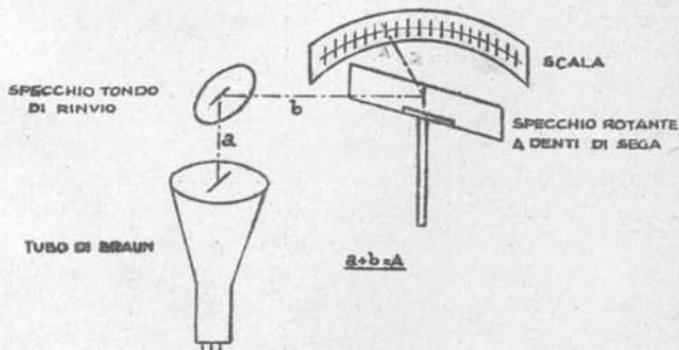


fig. 158

§ 5) - Ecogoniometro americano (Sonar).

Gli impianti ecogoniometrici americani (Sonar) possono avere proiettore ultrasonoro piezoelettrico o magnetostrittivo ma generalmente hanno quest'ultimo, normalmente con frequenza di 20 KHz.

Il proiettore magnetostrittivo è costruito da una serie di asticelle di nichel; un estremo di ognuna di esse è imprigionata in una piastra metallica, mentre l'altro estremo è libero. In ogni asticella vi è un avvolgimento e gli avvolgimenti sono connessi in serie. Una corrente continua otte-

nuta con apposito raddrizzatore dà la polarizzazione, cioè genera l'induzione continua che definisce il punto di lavoro nella caratteristica magnetostriettiva, del nichel, ed una corrente alternata ottenuta con un trasmettitore ad onde persistenti, manipolato automaticamente comanda la vibrazione meccanica.

I singoli elementi di nichel lavorano alla risonanza, secondo quanto indicato nel Cap.XI; e tutto il proiettore è racchiuso in una sfera ripiena d'acqua, una calotta della quale è costituita da una leggera membrana metallica, analoga a quella del proiettore P 600 (fig.159), dello spessore di circa 0,5 mm.

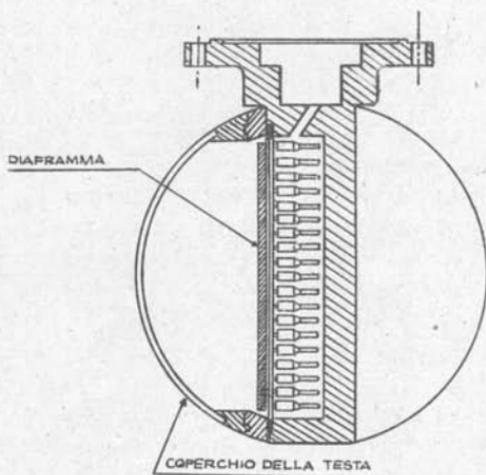


fig.159

Talvolta il proiettore è alloggiato entro una carcassa di protezione, disposta sotto lo scafo avente forma avviata (fig.160) ed è munito posteriormente di una piastra di materiale assorbente (baffle) alta poco più di 1 metro, che serve ad impedire di sentire echi spuri provenienti dal retro.

Talvolta invece il proiettore può fuoriuscire o rientrare entro un apposito incavo entro lo scafo, e questo

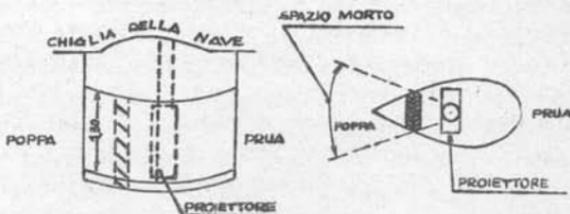


fig. 160

movimento è effettuato da un motore con arresto automatico a fine corsa del proiettore, e con avviamento a pulsante.

Esiste sempre la manovra a mano di riserva.

Il proiettore viene ruotato in un senso o nell'altro di 400° circa (escursione totale oltre due giri completi), da un motore che è comandato da un "generatore" di d.d.p. poste in plancia, azionate da manovella. Un ripetitore della posizione del proiettore, poste pure in plancia, permette di controllare in ogni istante l'orientamento del proiettore stesso rispetto all'asse della nave.

Il ricevitore è costituito da un amplificatore con cambiamento di frequenza. Il segnale di 20 KHz proveniente dal proiettore interferisce con quello di un oscillatore locale a 80 KHz dando luogo ad una tensione di 60 KHz. Questo segnale viene amplificato e successivamente convertito ad 800 Hz per battimento con un secondo oscillatore di 60.800 Hz. La tensione di uscita del ricevitore è applicata ad un tubo al neon ruotante, come negli indicatori di scandaglio.

La manipolazione è automatica, e il proiettore risulta connesso al trasmettitore per una piccola frazione del ciclo, mentre per il tempo rimanente destinato al rilevamento dell'eco, risulta connesso al ricevitore.

Le portate previste sono circa 1000, 2000, 5000 e 10.000, e la durata dell'impulso di trasmissione è più lunga per le portate maggiori; varia da $1/80$ al $1/30$ di secondo.

L'organo indicatore ruota con 4 velocità differenti.

È possibile effettuare la rivelazione audita dell'eco, al fine di distinguere dalla sua frequenza se esso non fosse invece qualche disturbo.

Il ricevitore può essere accordato esattamente sulla frequenza del proiettore variando l'accordo del circuito di entrata e la frequenza di oscillazione del primo convertitore, così come si fa in un normale ricevitore a supereterodina; i limiti di accordo sono 15 - 34 KHz, gli stessi del trasmettitore.

Il ricevitore ha un regolatore di volume ed uno di larghezza di banda in bassa frequenza, sempre intorno alla frequenza media di 800 Hz, il quale serve, entro certi limiti, a variare il rapporto segnale - disturbo.

Gli impianti americani sono generalmente dotati di un molto semplice tavolo previsore per il lancio delle bombe di profondità.

Tale tavolo fa parte dell'apparecchiatura ed è comandato dal ricevitore e dai pannelli di controllo. Esso è sostanzialmente costituito da una striscia di carta, che scorre con velocità costante (fig. 161) proporzionale alla cadenza degli impulsi di emissione, normalmente alla quale uno stilo si muove con velocità determinata in un senso, proporzionale alla cadenza e molto grande in senso opposto. Lo stilo che ha quindi un moto a denti di sega, parte da un estremo della striscia ad emissione di impulsi; sfiora la striscia lasciando una breve traccia all'inizio di ogni corsa, e lascia una seconda traccia all'arrivo dell'eco. È possibile quindi leggere su due scale graduate la distanza dell'ostacolo in funzione del tempo.

Una piastra trasparente parallela alla striscia, rigata con linee parallele e ruotabile intorno ad un asse normale alla striscia stessa, può essere ruotata normalmente dall'operatore in modo da determinare la inclinazione della linea formata dalla successione degli echi in corrispondenza dell'ultimo eco.

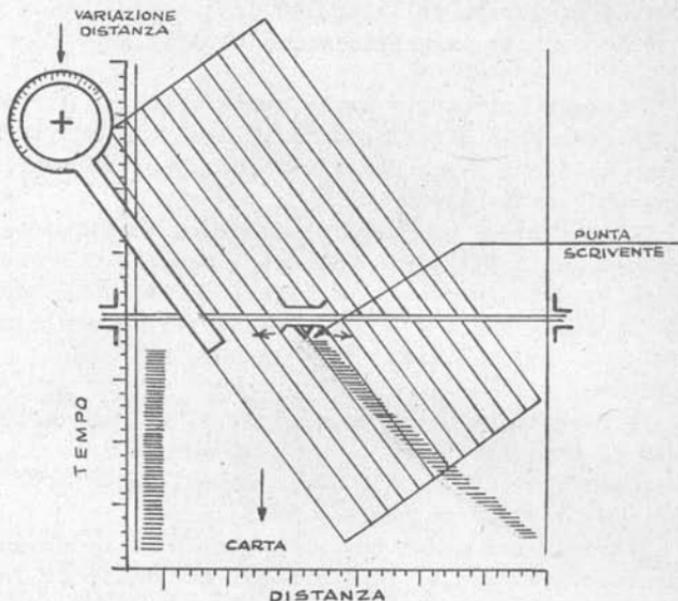


fig.161

In tal modo l'operatore può stabilire in ogni istante la derivata della curva delle distanze rispetto al tempo, la quale può essere costante o variabile.

Se il rilevamento viene fatto allorchè la prua della unità sta permanentemente diretta sull'ostacolo, estrapolando la legge di variazione della distanza nel tempo, si può determinare l'istante in cui l'unità si troverà sopra l'ostacolo.

Note le caratteristiche delle armi adoperate può essere stabilito l'istante del loro lancio.

In figura 162 è indicato lo schema generale a blocchi di un impianto Sonar con proiettore magnetostriativo.

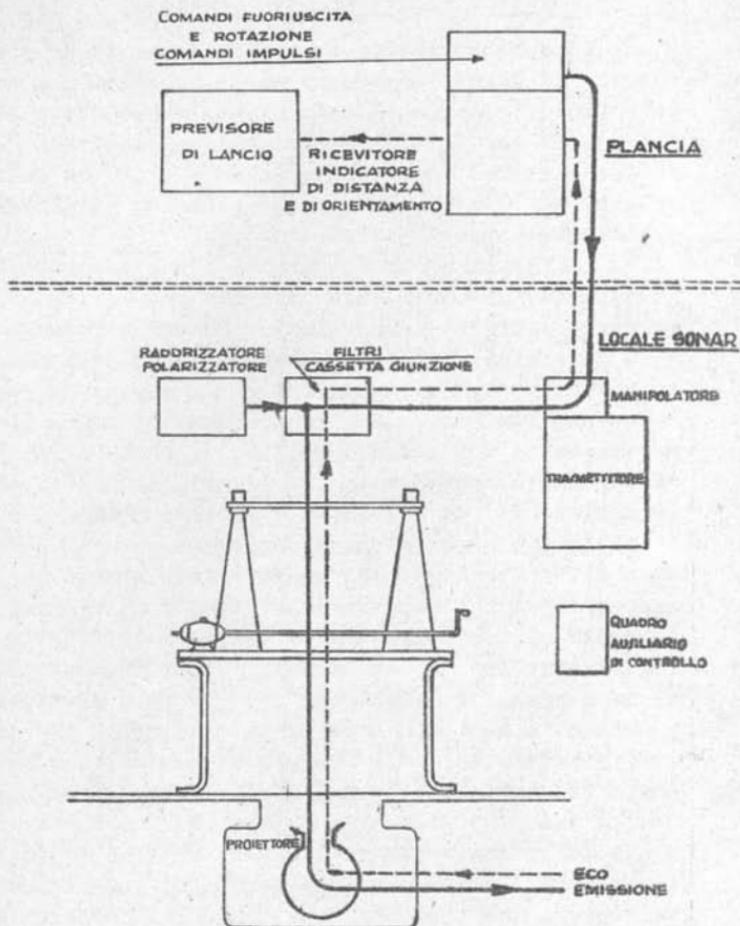


fig. 162

6) - Ecogoniometro inglese (Asdic).

Esso è costituito sostanzialmente da un proiettore a mosaico di quarzo sostenuto da un apposito meccanismo, che permette di rotarlo in modo da esplorare tutto l'orizzonte e di spostarlo verticalmente così da rientrare nello scafo del bastimento. Con commutazione fatta da un apposito relais, si passa da proiettore connesso al trasmettitore a proiettore connesso al ricevitore.

L'alimentazione del proiettore è ottenuta da un gruppo rotante, motore a corrente continua - alternatore, oppure da un oscillatore a valvole. La registrazione dell'eco e la determinazione della distanza dell'ostacolo viene fatta per mezzo di un registratore a punta scrivente.

Un involucro circonda completamente il proiettore, di sottile lamiera metallica a forma avviata, in modo da regolarizzare il moto dei filetti fluidi ed impedire la formazione di vortici durante il moto della nave. Una tavola di lancio, collegata al registratore, permette in base all'indicazione del registratore stesso di prevedere la posizione del sommergibile, tenuto conto anche della rotta della nave e della sua velocità, e di dare le opportune indicazioni per il lancio delle bombe di profondità contro il sommergibile. Il dispositivo per il sollevamento e la rotazione è mostrato schematicamente nella fig. 163. Il proiettore piezoelettrico (1) è fissato ad una colonna o tubo di supporto (2) sostenuto, attraverso cuscinetti reggispira (3) che lo lasciano libero di rotare, da una cuffia (4) che è sostenuta a sua volta da due tubi (5) che scorrono entro due sostegni (6) e che sono terminati inferiormente da due pistoni. I due pistoni, penetrano nell'interno della nave attraverso pressatrecce stagni (7), e presentano all'interno una filettatura, che fa presa con una lunga vite elicoidale (8) libera nella parte inferiore e fissata superiormente ad un secondo tubo (9) che può rotare su se stesso, ma non spostarsi verticalmente, perchè è sostenuto da due appositi cuscinetti reggispira (10 e 11). Questo secondo tubo porta nella parte inferiore una ruota dentata (12) che ingrana con una vite senza fine mossa da un motore elettrico.

I due pistoni, non potendo rotare su se stessi sono co-

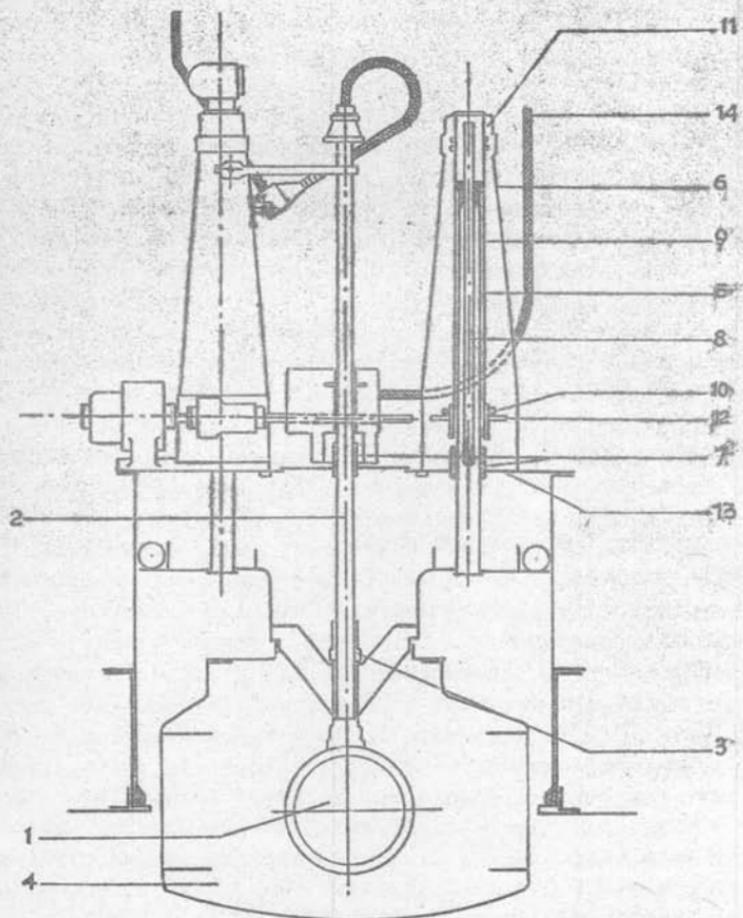


fig. 163

stretti quindi a spostarsi verticalmente, trascinando con sè i tubi interni e la cuffia ad essi fissata. Appositi contatti di fine corsa superiore ed inferiore arrestano

la marcia del motore quando la cuffia è giunta nelle due posizioni estreme ed impediscono false manovre.

Tutto il complesso delle aste di sostegno della cuffia è sorretto dalla parte superiore di un cassonetto in lamiera (13) che fa parte integrante dello scafo della nave e nel quale trova posto la cuffia quando è rientrata, in modo da evitare le sue sporgenze dalla chiglia nei periodi di riposo. Il movimento di rotazione della colonna del proiettore viene ottenuto per mezzo di un ingranaggio calettato su di essa, che ne comanda la posizione, e che ingrana con una prima vite senza fine. La vite senza fine viene fatta rotare attraverso un'altra coppia d'ingranaggi, vite senza fine e ruota dentata, con un rapporto totale 1 : 360, da un albero flessibile (14) comandato da un volantino posto nella camera di manovra. Il dispositivo di rotazione è fissato sul copercchio del cassonetto e la colonna ingrana con questo soltanto quando è abbassata in condizioni di funzionamento.

A un giro dell'albero flessibile corrisponde una rotazione di due gradi del proiettore ed un giro del volante di comando una rotazione di 20 gradi. La posizione del proiettore è indicata da un indice opportunamente rapportato, che permette di leggere l'orientamento del proiettore rispetto all'asse della nave su un cerchio fisso, graduato da 0 a 360 gradi. All'interno del cerchio graduato fisso è disposto un secondo cerchio graduato mobile collegato con una ripetitrice di girobussola. La lettura dell'indice rispetto al quadrante mobile dà in ogni istante la posizione del proiettore rispetto al Nord e non rispetto alla prua.

Il proiettore è costituito da due mosaici piezoelettrici (fig. 164). Ognuno di essi è formato da una piastra centrale sottile (1) che porta a destra e a sinistra due mosaici di quarzi (2) e due piastre di ferro (3).

La piastra centrale è sottile, le due piastre laterali hanno uno spessore variabile con la frequenza, in modo da realizzare una vibrazione totale su mezza lunghezza d'onda con due ventri sulle due superfici laterali. I due mosaici non sono completi, i cristalli non ricoprono tutta la superficie delle piastre, ma sono disposti a strisce orizzontali di 16 mm. di spessore ciascuna, separate da intervalli di circa 30 mm. In tal modo, la quantità di quarzo adoperata

è molto più piccola e si possono impiegare cristalli di dimensioni minori.

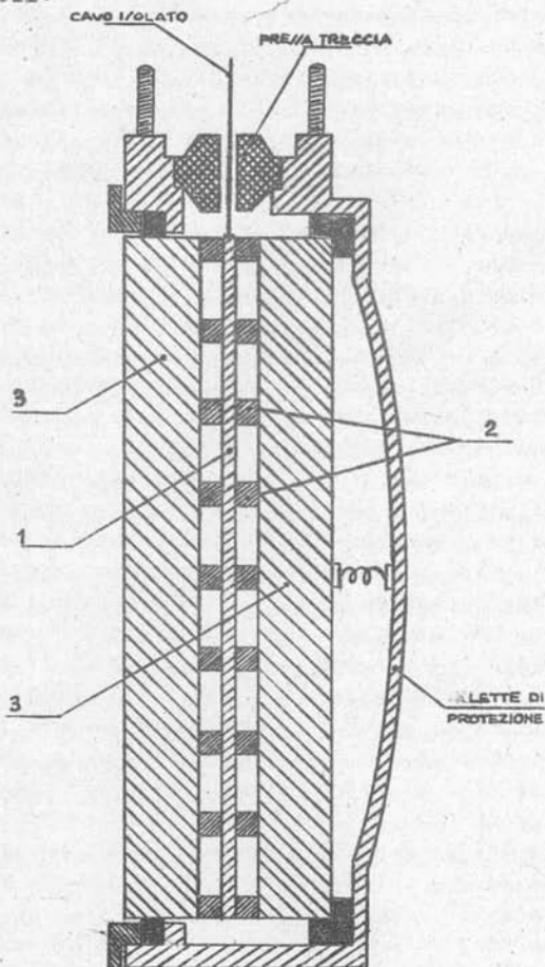


fig.164

I quarzi sono fissati con una soluzione di balsamo del Canada nell'alcool metilico. Vengono impiegati nove tipi di proiettori diversi di frequenza variabile di 1000 in 100 Hz da 14 a 22 KHz. Il diametro del proiettore è di 380 mm., il collegamento del proiettore al trasmettitore ed al ricevitore viene fatto per mezzo di un cavo ad alta tensione che corre nell'interno della colonna e che fa capo ad un collettore a due anelli poste nella parte superiore.

La potenza elettrica, quando è fornita da un gruppo, motore a c.c. alternatore, dotata di un regolatore, mantiene costante la frequenza perchè sta entro stretti limiti il numero di giri. Questo può essere fissato ad una velocità variabile fra 4600 e 7600 giri al minuto, in modo da poter ottenere dallo stesso gruppo tutte le diverse frequenze necessarie per l'alimentazione del mosaico. L'alternatore genera una tensione di circa 100 V che per mezzo di un circuito risonante formato da un'induttanza fissa e da una capacità variabile a salti mette in risonanza il circuito fermato dalla reattanza interna dell'alternatore e dalla capacità del mosaico. Il mosaico è in parallelo alla capacità semifissa e l'induttanza in serie con questa.

L'amplificatore di ricezione è a quattro valvole: una amplificatrice d'alta frequenza, una oscillatrice e due amplificatrici di bassa frequenza. All'entrata dell'amplificatore è disposto un circuito risonante; le tensioni da questo amplificatore vengono miscelate in un modulatore ad ossido di rame a quelle dell'oscillazione locale. I battenti a bassa frequenza vengono amplificati dalla prima valvola di bassa frequenza e portati nella cuffia.

Lo stadio successivo a bassa frequenza amplifica ulteriormente e permette l'azionamento di un altoparlante e del dispositivo di registrazione. L'oscillatore locale ed il circuito d'entrata sono accordati per mezzo di un condensatore variabile in modo da funzionare con mosaici di diverse frequenze.

L'amplificatore è dotato di un particolare dispositivo di bloccaggio. Una parte della tensione dell'alternatore viene raddrizzata e fornisce un potenziale negativo che viene applicato alla griglia della valvola in alta frequen-

za durante l'emissione, in modo da bloccarla. Un circuito formato da una resistenza con una capacità in parallelo dà un'opportuna costante di tempo in modo che la sensibilità dell'amplificatore aumenti gradualmente durante la ricezione e dia una sensibilità minore per echi più vicini e maggiore per gli echi lontani.

L'oscillatore è regolato in modo da portare la frequenza 1000 Hz circa più in alto o più in basso di quella di emissione.

In posizione trasmissione il relais inserisce il proiettore in parallelo alla capacità semifissa con in serie la induttanza di accordo ed applica alla griglia della prima valvola dell'amplificatore la tensione. In posizione ricezione il proiettore è invece collegato all'entrata dello amplificatore. La ricezione è per massimo.

Il relais è comandato da un tasto manipolatore che viene chiuso a piacere dall'operatore o da un contatto del registratore.

Il registratore posto in camera di manovra permette di ottenere in ogni istante la distanza dell'oggetto immerso e con successivi rilevamenti traccia graficamente la curva della distanza d'eco in funzione del tempo, in modo del tutto analogo a quelle adottate negli impianti Sonar americani.

7) - Considerazioni sull'utilizzazione degli ecogenimetri.

La portata di un ecogenometro dipende non soltanto dalla messa a punto e dall'efficienza dell'impianto ma anche da obiettive condizioni di propagazione dell'ultrasuono nell'acqua. Se il mezzo fosse uniforme e senza viscosità, la pressione dell'onda ultrasonora dovrebbe variare inversamente alla distanza, e, ammettendo una reirradiazione da parte dell'ostacolo, la pressione dell'onda sonora di eco dovrebbe essere inversamente proporzionale al quadrato della distanza, quindi la potenza specifica inversamente pro-

porzionale alla quarta potenza della distanza.

La presenza della viscosità del mezzo provoca una attenuazione proporzionale al quadrato della frequenza, e quindi la pressione sonora dell'eco cala più rapidamente di quanto comporti la legge quadratica.

Inoltre il mezzo non è uniforme, bensì varia, in funzione della distanza dalla superficie, la temperatura, la salinità e la densità per effetto della pressione.

Ciò dà luogo ad una variazione della velocità di propagazione del suono in funzione della profondità, e di conseguenza un raggio sonoro che esce inclinato dal proiettore, curva verso il basso se il gradiente della velocità del suono è negativo (cioè se la velocità di propagazione diminuisce allontanandosi dalla superficie), mentre curva verso l'alto se il gradiente della velocità di propagazione è positivo. In generale la temperatura dell'acqua diminuisce abbassandosi sotto la superficie^(*) e il gradiente di velocità dovuto a questa causa, è negativo, compensando abbondantemente il gradiente positivo che eventualmente si produce per altre cause.

Uno speciale strumento, il batitermometro si cala in mare e automaticamente ^{registra} la temperatura in funzione della profondità. Da tale diagramma si può prevedere la curvatura dei raggi sonori e quindi l'allargamento del lobo di emissione dell'ultrasuono (fig.166).

Questo fenomeno, che di per sé produce una diminuzione della portata degli ecogoniometri può dare luogo in acque basse, a zone di silenzio intercalate a zone di eco. (fig.167), ed il Comando dell'unità deve in ogni momento tenere bene presente, nell'interpretazione dei risultati ecogoniometrici, queste eventuali anomalie della propagazione.

Non è qui il caso di citare i metodi di ricerca e di attacco a mezzo di ecogoniometri, ed i problemi cinematici relativi, i quali sono risolvibili solo allorché si conosca con ragionevole precisione le portate e le precisioni raggiungibili con i vari impianti nelle varie condizioni di impiego.

(*) -- Vedi (fig.165).

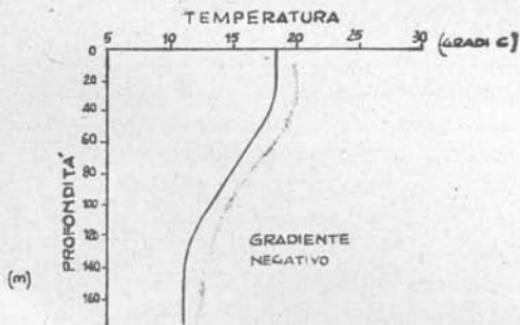


fig. 165

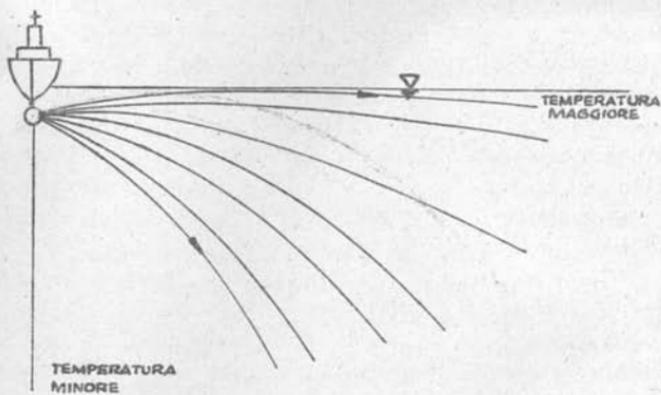


fig. 166

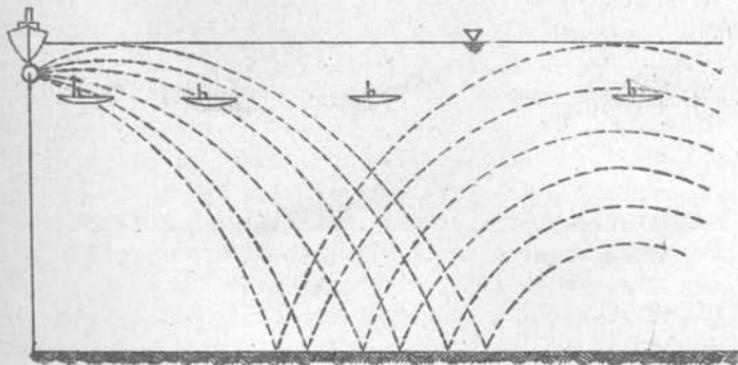


fig. 167

Basti qui solo ricordare che allorchè l'ecogoniometro è in fase di scoperta, si inserisce la gamma relativa alla maggiore portata, il massimo di sensibilità del ricevitore e la minore direttività del proiettore (se è variabile), mentre in fase di attacco si riduce il guadagno, si inserisce la massima direttività e la gamma relativa alla portata minore.

La ricerca sistematica viene normalmente limitata a due settori di 60 e 90° rispetto alla prua, ed è effettuata automaticamente.

Se l'ostacolo è un sommergibile immerso il contatto ecogoniometrico viene generalmente perduto al disotto di una distanza per la quale il sommergibile esce dal lobo di emissione. Tale distanza variabile tra 50 e 500 m., è tanto maggiore quanto maggiore è la profondità del sommergibile (fig. 167).

E' da tenersi presente che strati di separazione tra acque dolci e salate, grandi pesci o banchi di piccoli pesci, nugoli di bollicine di gas, coste ecc., possono dare luogo ad echi spuri, e che le disuniformità delle masse di acqua e le onde superficiali possono dare echi continui il cui insieme prende il nome di: riverberazione nel mare.

Scie di navi e di sommergibili possono dar luogo a echi altrettanto intensi di quelli degli ostacoli stessi.

Un criterio distributivo tra un ostacolo mobile (sommergibile e pesce) ed uno qualsiasi fermo (scie, coste, discontinuità del mezzo, ecc.), è la esistenza, o meno, dell'effetto Doppler, cioè della variazione della frequenza dell'eco rispetto a quella dell'impulso di emissione. L'effetto Doppler non viene rivelato con la ricezione ottica, ma può essere percepito con la ricezione auditiva.

Questo fenomeno, che viene in generale considerato come quasi determinante nella ricerca ecogoniometrica di sommergibili, non ha tuttavia luogo quando la velocità mutua del sommergibile rispetto all'ecogoniometro è normale alla congiungente il sommergibile con l'ecogoniometro stesso.

ooooo

oooo

oo

I N D I C E

—oO—

Cap. I - PROPAGAZIONE DEI SUONI

Par.1 - Teoria generale delle perturbazioni meccaniche in un fluido perfetto denso e deformabile.....	Pag. 5
" 2 - Velocità di propagazione	" 10
" 3 - Onde piane ed onde sferiche	" 13
" 4 - Perturbazioni con andamento sinusoidale ...	" 17
" 5 - Propagazione del suono in un condotto uniforme.	" 24
" 6 - Propagazione dei suoni in un cond. discontinuo.	" 43
" 7 - Adattamento di impedenze acustiche	" 61
" 8 - Vibrazione di un pistone rigido	" 65

Cap. II - VIBRAZIONI MECCANICHE

Par.1 - Oscillazioni forzate	" 75
" 2 - Oscillazioni libere	" 82
" 3 - Dissipazione di potenza nelle oscillazioni forzate	" 83
" 4 - Sospensione elastica della macchina	" 87

Cap. III - ACUSTICA AMBIENTALE

Par.1 - Trasmissione dei suoni	" 93
" 2 - Propagazione sonora entro un ambiente limitato	" 99
" 3 - Tempo di riverberazione	" 103

Cap. IV - STRUTTURA DEI SUONI

Par. 1 - Analisi dei suoni	Pag. 109
" 2 - Riproduzione sonora	" 112
" 3 - Distorsioni	" 116

Cap. V - ACUSTICA FISIOLOGICA

" 1 - Udito	" 119
" 2 - Voce	" 131
" 3 - Compensibilit�	" 135

Cap. VI - PROPRIETA' DIRETTIVE

" 1 - Caratteristiche di direttivit�	" 141
" 2 - Sistema di due elementi puntiformi ...	" 144
" 3 - Sistema disposto su base lineare	" 148
" 4 - Sistema disposto su base circolare ...	" 156
" 5 - Elementi puntiformi disposti comunque.	" 164
" 6 - Propriet� direttive di elementi di gran de superficie	" 166
" 7 - Considerazioni generali sui sistemi di- rettivi	" 172

Cap. VII - TRASFORMAZIONI ELETTROACUSTICHE

" 1 - Quadripoli elettroacustici	" 177
" 2 - Principi fisici che regolano le trasforma- zioni elettroacustiche	" 180

Cap. VIII - MICROFONI

" 1 - Risposta dei microfoni	" 187
" 3 - Microfono a polverine di carbone	" 195
" 4 - Microfoni trasformatori di energia...	" 201

Cap. IX - TELEFONI

Par. 1	- Principi di funzionamento	Pag. 211
" 2	- Teoria schematica del telefono magne- tico	" 212
" 3	- Telefono piezoelettrico	" 222

Cap. X - IMPIANTI TELEFONICI

" 1	- Generalità	" 225
" 2	- Impianti telefonici	" 227
" 3	- Reti telefoniche di bordo	" 232
" 4	- Circuiti virtuali e telefonia speciale "	236
" 5	- Telefonia automatica	" 239
" 6	- Moderni sistemi di telefonia..... "	249
" 7	- Cenni sui collegamenti radiotelegrafici"	251

Cap. XI - ALTOPARLANTI

" 1	- Principi generali	" 257
" 2	- Altoparlante elettrodinamico a corno .. "	260
" 3	- Altoparlanti magnetostatici ed elettro- statici	" 271

Cap. XII - SEGNALAZIONE SUBACQUEA

" 1	- Generalità	" 275
" 2	- Segnalatori subacquei	" 279
" 3	- Impianto di segnalazione a spada	" 281

Cap. XIII - IDROFONIA

" 1	- Generalità e definizioni	" 285
" 2	- Ricevitori idrofonicici	" 286
" 3	- Rilevamento idrofonicico	" 288

Par. 4 - Impianti idrofonici	Pag. 296
" 5 - Efficienza degli impianti idrofonici "	301
" 6 - Idrofonì per ultrasuoni	" 302

Cap. XIV - ULTRASUONI

" 1 - Generalità	" 309
" 2 - Piezoelettricità	" 313
" 3 - Magnetostrizione	" 324

Cap. XV - SCANDAGLI

" 1 - Generalità	" 330 bis
" 2 - Scandaglio piezoelettrico	" 331
" 3 - Scandagli magnetostrittivi	" 339

Cap. XVI - ECOGONIOMETRI

" 1 - Generalità	" 345
" 2 - Ecogoniometro piezoelettrico e magnetostrittivo	" 349
" 3 - Ecogoniometro Tipo P 600	" 352
" 4 - Ecogoniometro Tipo S	" 360
" 5 - Ecogoniometro americano (Sonar)	" 378
" 6 - Ecogoniometro inglese (Asdic)	" 384
" 7 - Considerazioni sull'utilizzazione degli ecogoniometri	" 389

AAAAA

AAA

A

PROPAGAZIONE DEI SUONI

§ 1 - Teoria generale delle perturbazioni meccaniche in un fluido perfetto.-

Si consideri un fluido compressibile, indefinito e non viscoso il quale, in assenza di perturbazione, abbia una densità uniforme ρ_0 .

Si supponga che in una zona qualsiasi di esso una causa esterna produca una perturbazione, ad esempio spostando gruppi di molecole del fluido dalle loro posizioni di riposo. Tale perturbazione, per la compressibilità del fluido, si farà risentire nelle parti di fluido adiacenti alla zona suddetta, dando luogo ad un fenomeno di cui si vogliono determinare le leggi.

Per semplicità si limitano le considerazioni al caso in cui la funzione, che dà la velocità delle singole particelle del fluido ammetta un potenzial in ogni punto del campo; cioè il moto delle particelle del fluido sia irrotazionale.

Siano x, y, z , le coordinate di un punto generico A; ξ', η', ζ' , le componenti secondo gli assi coordinati della velocità delle molecole, o particelle, del fluido nel punto A, e la funzione scalare: $-\varphi(x, y, z, t)$ il potenziale di velocità.

Per definizione è quindi

$$\xi' = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad \eta' = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad \zeta' = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (1)$$

sia ρ la densità in un punto generico del fluido, la quale sia funzione del tempo, ma, in prima approssimazione si ammetta poco dipendente dalle coordinate del punto e quindi confondibile con quella del fluido a riposo.

In tali ipotesi si possono scrivere due relazioni:

per un determinato volume di spazio occupato dal fluido, ad esempio: un cubetto di lati dx , dy , e dz : l'equazione di continuità e quella di equilibrio.

L'equazione di continuità significa che la massa di fluido entrante nell'unità di tempo dalle pareti del cubetto diminuita dalla massa di fluido uscente, è pari all'accrescimento di massa entro il cubetto nell'uscita di tempo. Analiticamente si esprime:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) = \rho \Delta_2 \psi \quad (2)$$

L'equazione di equilibrio significa che in ogni istante la differenza tra le forze agente nelle facce del cubetto è pari alla massa del fluido crescente in esso per la sua accelerazione.

Se p è la pressione al disopra di quella statica p_0 , tale equazione integrata dal punto considerato allo infinito, ove si suppone nulla la funzione potenziale, è espressa analiticamente così:

$$p = \rho \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (3)$$

Combinando le sue equazioni si ottiene la relazione finale:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2 \Delta_2 \psi ; \quad (4)$$

ove c è la radice del rapporto ha la variazione della pressione in un punto rispetto a quella statica, e la variazione della densità rispetto a quella ρ_0 statica.

Questa è una relazione di propagazione, in tutte le deviazioni per la simmetria delle coordinate spaziali e con velocità uguale c , della funzione potenziale ψ .

Poichè delle (1) e (3) si ricavano le velocità degli elementi del mezzo e le sovrappressioni, ciò significa che tutta la perturbazione si sta propagando.

Aver quindi ammesso che il fluido fosse denso e compressibile, porta come conseguenza che una perturbazione generata in una zona non può restare limitata a quella zona, ma deve propagarsi in ogni direzione con la stessa velocità, fino a distanza infinita.

§2 - Velocità di propagazione

Della velocità c si possono dare varie espressioni in funzioni dei parametri fisici del fluido, se ϵ è il coefficiente di compressibilità (cioè il rapporto tra una variazione di pressione e la conseguente variazione percentuale di volume) risulta:

$$c = \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho_0}} \quad (5)$$

Per un gas, trattandosi di perturbazioni adiabatiche, si ottiene

$$c = \sqrt{\frac{p_0 \gamma}{\rho_0}} \quad (6)$$

ove p_0 è la pressione statica e γ il rapporto tra i calori specifici. Incidentalmente può ricordarsi che è $\epsilon = \gamma p_0$.

§3 - Onde piane ed onde sferiche

La determinazione della funzione potenziale $\psi = \psi(x, y, z, t)$ è possibile solo se si conoscono le condizioni al contorno di un determinato spazio.

Le condizioni ai limiti sono definite dallo stato di moto delle superfici che limitano lo spazio occupato dal mezzo, cioè dalle superfici delle sorgenti di perturbazione e dalla superficie di separazione del mezzo considerato da altri mezzi, che può essere anche il piano all'infinito.

Vengono esaminati due casi particolari interessanti le perturbazioni piane e quelle sferiche.

Nel caso di perturbazioni piane, ponendo la direzione di propagazione delle perturbazioni secondo l'asse x , la (4) diviene una equazione alle derivate parziali delle 2 variabili x e t :

$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} = c^2 \frac{d^2 \psi}{dx^2} \quad (6)$$

E' facile verificare che le funzioni $f_1(t - \frac{x}{c})$ ed $f_2(t + \frac{x}{c})$ sono due integrali particolari della (4); quindi l'integrale generale, che deve contenere due funzioni arbitrarie, della funzione potenziale ψ risulta allora:

$$\psi = f_1(t - \frac{x}{c}) + f_2(t + \frac{x}{c}) \quad (7)$$

in cui $f_1(ct - x)$ ed $f_2(ct + x)$ rappresentano 2 funzioni arbitrarie, ma derivabili, delle grandezze $(t - \frac{x}{c})$ e $(t + \frac{x}{c})$. La f_1 rappresenta una propagazione nella direzione positiva dell'asse della x e la f_2 una propagazione negativa. Ponendo le condizioni ai limiti si definisce completamente la ψ .

Il fatto della propagazione delle perturbazioni, cioè l'assunzione dello stesso valore della ψ (e quindi della velocità e della pressione che da essa conseguono) per un determinato valore della quantità $t - \frac{x}{c}$, permette di affermare che la perturbazione avviene secondo onde di moto, o più semplicemente di onde.

Le condizioni ai limiti sono determinate dalla conoscenza della funzione potenziale alla sorgente ed all' e sterno del campo.

Nel caso di onde sferiche conviene passare dalle coordinate cartesiane (x, y, z) a quelle polari (r, θ, ψ) .

In tale sistema di coordinate la (7) assume la forma:

$$\varphi = \frac{1}{r} \varphi_1\left(t - \frac{r}{c}\right) + \frac{1}{r} \varphi_2\left(t + \frac{r}{c}\right) \quad (8)$$

Il primo termine rappresenta un'onda divergente dall'origine ed il secondo termine un'onda convergente verso l'origine, entrambe con velocità c .

Si considera spesso la sola onda divergente, cioè quella emessa dalla sorgente nell'origine. La funzione potenziale diviene:

$$\varphi = \frac{1}{r} \varphi_1\left(t - \frac{r}{c}\right) \quad (9)$$

§ 4 - Perturbazioni sferiche con andamento sinoidale

Supponiamo, ad esempio, che la funzione potenziale abbia un andamento sinoidale:

$$\varphi = \frac{a}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c}\right)$$

in cui a ed ω sono due costanti arbitrarie.

Il caso particolare di andamento sinoidale è tuttavia assai generale, in quanto se la φ ha un andamento periodico è scomponibile in serie di Fourier di componenti sinoidali di frequenze discrete e ampiezze finite; se la φ non è periodica, è rappresentabile per mezzo dello integrale di Fourier da componenti sinoidali di frequenze continue ed ampiezze infinitesime.

La velocità in questo caso è diretta secondo il raggio r ed analogamente alla (1) è esprimibile da:

$$\xi' = - \frac{\partial \varphi}{\partial r} .$$

Ricordando la (3), si può calcolare il rapporto tra pressione e velocità:

$$\frac{p}{\xi'} = \rho c \left\{ \frac{1}{1 + \frac{c^2}{\omega^2 r^2}} + j \frac{\frac{c}{\omega r}}{1 + \frac{c^2}{\omega^2 r^2}} \right\} = x + jy \quad (10)$$

solo se $r \gg \frac{c}{\omega} = \frac{\lambda}{2\pi}$, cioè oltre una certa distanza dalla sorgente, p e ξ' sono proporzionali di rapporto costante ρc ed in fase tra di loro. Se questo non è p e ξ' risultano tra loro sfasati. In fig. 1 è indicato il rapporto p/ξ' in funzione di $\omega r/c$.

La potenza media erogata dalla sorgente di perturbazioni e quindi quella che transita attraverso ad una superficie sferica di raggio r è:

$$P = \frac{1}{T} \int_T 4\pi r^2 p \xi' dt ;$$

ove T è un periodo od un suo multiplo.

Calcolato l'integrale, e chiamata potenza specifica P_s la potenza che transita attraverso l'unità di superficie, segue:

$$P_s = \frac{P}{4\pi r^2} ,$$

$$P_s = \frac{1}{2} \rho c \xi'^2_{\max} , \quad (11)$$

$$P_s = \frac{1}{2} \frac{p_{\max}^2}{\rho c} ; \quad (12)$$

ove ξ'_{\max} e p_{\max} sono i valori massimi della velocità e della pressione, e nel caso di onde piane, ed a notevole distanza dalla sorgente nel caso di onde sferiche (10) si ha:

$$p = \rho c \xi' . \quad (13)$$

Confrontando le tre espressioni ultime con quelle della elettrotecnica, nel caso di correnti alternate sinusoidali,

$$V = RI , \quad P_c = \frac{R I_{\max}^2}{2} , \quad P = \frac{1}{2} \frac{v_{\max}^2}{R} ;$$

si nota, fra grandezze elettriche ed acustiche una corrispondenza che può essere riassunta, per le grandezze sino ad ora incontrate dal seguente prospetto:

Grandezze elettriche	V	I	R	P_c
Grandezze acustiche	p	ξ'	ρc	$P_{\text{spec.}}$

Per questa ragione alla quantità ρc si dà il nome di resistenza acustica o resistenza di radiazione del mezzo considerato, e si misura in Ohm acustici.

§ 5 - Propagazione per onde piane in condotto uniforme

Il condotto uniforme può essere immaginato separando un cilindro con asse secondo la direzione della perturbazione sonora per onde piane in uno spazio indefinito.

Come è noto, in onde piane si hanno:

quando la funzione potenziale ha gli stessi valori su tutti i punti di un piano e ciò avviene su un fascio di piani paralleli. L'equazione è la (6), e dello stesso tipo sono le relazioni che determinano la pressione e la velocità degli elementi del mezzo.

Ammettendo una propagazione solo secondo l'asse positivo delle x ed una perturbazione di andamento sinusoidale, espresso in forma simbolica

$$\varphi = \varphi_0 e^{j\omega(t - \frac{x}{c})};$$

dalle (1) e (3) si ricavano le relazioni:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial x} = -j\omega \rho \xi \\ \frac{\partial \xi}{\partial x} = -j\frac{\omega}{c} p \end{cases} \quad (14)$$

Queste relazioni sono analoghe a quelle che definiscono la propagazione della tensione v e corrente i nelle linee a costanti distribuite reattive: induttanza L_1 per unità di lunghezza e capacità C_1 per unità di lunghezza.

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial x} = -j\omega L_1 i \\ \frac{\partial i}{\partial x} = -j\omega C_1 v \end{cases} \quad (15)$$

Quindi le soluzioni ottenute nel caso delle linee sono, con rotazioni di simboli, applicabili al caso della propagazione sonora per onde piane, cioè è lo stesso, in condotto uniforme a pareti rigide.

- in luogo della tensione v , la pressione sonora p
- " " " corrente i , la velocità ξ' degli elementi del mezzo
- " " " induttanza L_1 , per unità di lunghezza di linea, la densità ρ
- " " " capacità C_1 per unità di lunghezza di linea, l'inverso $\frac{1}{\epsilon}$ del coefficiente di compressibilità.

La pressione p e la velocità ξ' degli elementi del mezzo, in una sezione generica del condotto di coordinata x , sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} p = p_0 \left(Y \operatorname{sen} \frac{\omega x}{c} + \cos \frac{\omega x}{c} \right) \\ \xi' = \frac{p_0}{\rho c} \left(-j \operatorname{sen} \frac{\omega x}{c} + jY \cos \frac{\omega x}{c} \right) \end{array} \right. \quad (16)$$

in cui p_0 è la pressione sonora generata ad una delle estremità del condotto, e, ponendo $a = \omega/c$

$$Y = \frac{\rho c \cos al + jZ \operatorname{sen} al}{-\rho c \operatorname{sen} al + jZ \cos al} ;$$

ove Z è l'impedenza acustica della chiusura dell'altro terminale del condotto a distanza l dal primo.

Si possono cioè trovare per via acustica le condizioni di onde stazionarie, di risonanza, ecc.

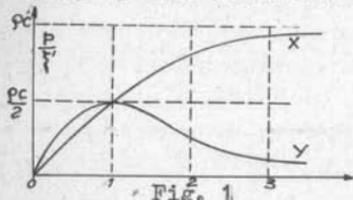


Fig. 1

Un caso molto interessante si presenta quando si ha, in un condotto a sezione uniforme, il passaggio di un'onda sonora da un mezzo di resistenza acustica $\rho_1 c_1$ ad

ad uno di resistenza acustica diversa $\rho_2 c_2$.

Per la corrispondenza fra fenomeni acustici ed elettrici si può affermare che sulla superficie di separazione dei due mezzi si avrà una riflessione e solo una parte della potenza incidente si propagerà nel secondo mezzo.

E' possibile, mediante l'interpolazione fra i due mezzi di un terzo mezzo di resistenza acustica $\rho_x c_x$, e di lunghezza l far sì che tutta la potenza transitante nel primo tratto si trasferisca nel secondo (fig. 2).

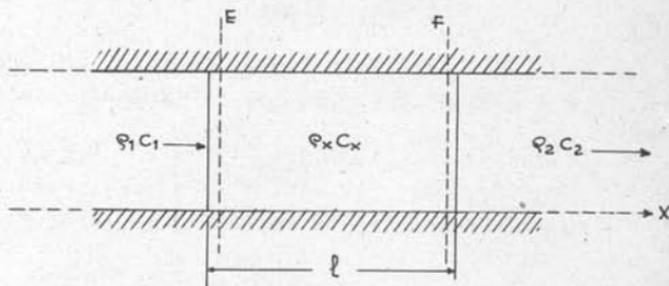


Fig. 2

Dalle (16), imponendo la continuità del rapporto p/ξ in corrispondenza delle sezioni E ed F, si ricava che la soluzione del problema è possibile, allorchè :

$$\rho_x c_x = \sqrt{\rho_1 c_1 \rho_2 c_2} \quad \text{ed} \quad l = (2K + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (17)$$

Si può quindi concludere che il tratto interposto, di resistenza acustica uguale alla media geometrica delle due resistenze acustiche e di lunghezza un multiplo dispari del quarto d'onda, funziona da adattatore di impedenze e permette la trasmissione integrale dell'energia sonora da un mezzo all'altro. Ovviamente l'adattamento di impedenze che vale per propagazione dell'energia sonora dal primo al secondo mezzo vale anche per propagazione del secondo al primo mezzo.

Fino a questo punto sono state analizzate le relazioni che determinano la pressione p , e la velocità ξ degli

elementi di un mezzo, il quale è sede di un'onda piana. Si è supposto che ad un estremo ($x = 0$) del condotto vi sia un generatore di pressione di ampiezza p_0 , ed all'altro estremo ($x = l$) il condotto sia terminato da un secondo mezzo la cui impedenza di entrata è $Z = \left(\frac{p}{v}\right)_1$.

Occorre ora calcolare i parametri del suono che si propaga al di là della sezione di ascissa l , cioè in un secondo mezzo il quale abbia una resistenza caratteristica $\rho_2 c_2$ pari a Z .

Per maggior generalità si considera qui un'onda incidente non normalmente sul piano di separazione tra i due mezzi.

Si indichino con gli indici i , r e t rispettivamente le grandezze che si riferiscono al raggio sonoro incidente, al raggio riflesso ed al raggio trasmesso (figura 3).

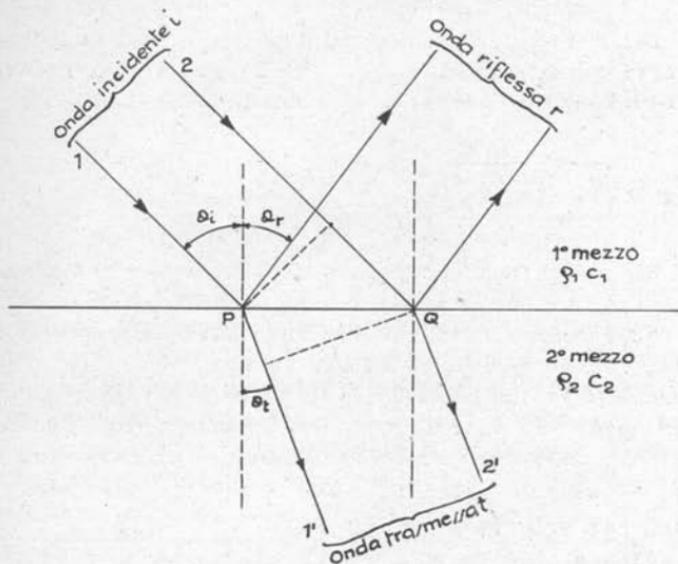


Fig. 3

Sul piano di separazione si deve avere continuità del movimento secondo la normale al piano di separazione stesso, in quanto non vi può essere distacco degli elementi del materiale gli uni dagli altri, e si deve avere continuità della pressione. Per contro può esservi una discontinuità della componente tangenziale della velocità in quanto il primo mezzo può scorrere rispetto al secondo, sul piano di separazione.

Da queste condizioni si ricava:

$$\theta_i = \theta_r \quad \text{e} \quad \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{c_1}{c_2}$$

$$\frac{\xi_r}{\xi_i} = \frac{\rho_1 c_1 \cos \theta_t - \rho_2 c_2 \cos \theta_i}{\rho_1 c_1 \cos \theta_t + \rho_2 c_2 \cos \theta_i}, \quad (18)$$

$$\frac{\xi'_t}{\xi'_i} = \frac{2 \rho_1 c_1 \cos \theta_i}{\rho_1 c_1 \cos \theta_t + \rho_2 c_2 \cos \theta_i};$$

e per incidenza normale:

$$\frac{\xi_r}{\xi_i} = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}, \quad \frac{\xi'_t}{\xi'_i} = \frac{2 \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (19)$$

Per la (13) è facile scrivere i corrispondenti rapporti tra le pressioni p_r/p_i e p_t/p_i .

Dalle (11) e (12) si ricavano i rapporti r tra potenza specifica riflessa ed incidente, e t ha potenza specifica trasmessa ed incidente

$$r = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2 \quad t = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2} \quad (20)$$

§ 7 - Propagazione in condotti disuniformi

L'equazione generale di propagazione si ricava direttamente combinando l'equazione di equilibrio (3), con la equazione di continuità di un cilindretto di sezione S pari a quella del condotto e di altezza dx .

Risulta allora l'equazione di Webster

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \left\{ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial (\lg S)}{\partial x} \right\} \quad (21)$$

che se S è costante si riduce alla (6).

Un caso interessante si ha per condotti indefiniti a profilo esponenziale cioè tali che $S = S_0 e^{\frac{mx}{l}}$.

Essi, se eccitati con una perturbazione sinusoidale nel tempo, danno luogo alla proprietà di non trasmettere potenza acustica se la frequenza è minore di $f_0 = \frac{mc}{4\pi}$.

A parità di $\varphi = \Phi \cos \omega t$ la trasmissione di potenza specifica tende al valore costante

$$P_0 = \frac{\rho c}{2} \Phi^2 \frac{S_0}{S} \quad (22)$$

ove S_0 è la sezione del condotto all'ascissa $x = 0$.

La tromba esponenziale si comporta quindi come un filtro passa-alto.

Se il condotto non è illimitato, come si è finora supposto, ma invece è di lunghezza finita, vuol dire che nella sezione in cui esiste la variazione di mezzo, si produce una riflessione e quindi nasce una onda che si propaga in senso opposto.

La potenza specifica radiata, per effetto di tali onde stazionarie, ha, in funzione della frequenza un andamento fluttuante (fig. 4)

E' possibile, con forme opportune di condotto, attuare una propagazione sonora che abbia la proprietà di lasciare passare la potenza sonora con leggi che sono funzioni della frequenza.

Dopo quanto è stato stabilito al paragrafo 4, è facile vedere a cosa può farsi corrispondere, in acustica, alla induttanza ed alla capacità elettrica.

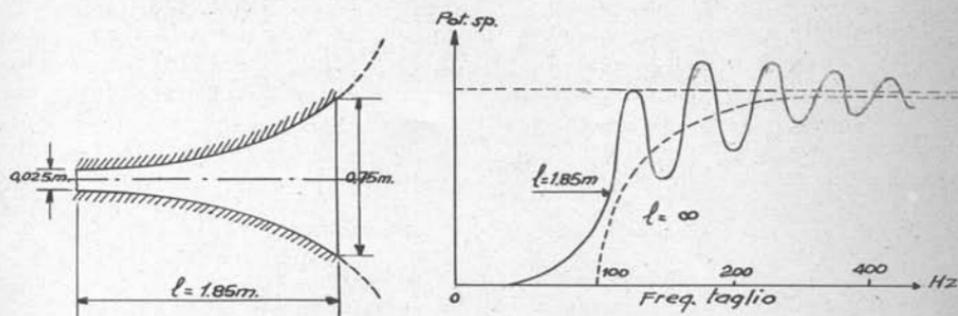


Fig. 4

La massa $m = \rho l S$ del mezzo contenuto in un canalino di sezione S e lunghezza l , che, per le piccole dimensioni si possa considerare in moto rigido, corrisponde alla induttanza L . La costante di elasticità h che risulta comprimendo o decomprimendo con un pistone attraverso un collo di sezione S il mezzo contenuto in un volume V , corrisponde all'inverso della capacità $1/C$.

Poichè la costante elastica h è, per definizione, il rapporto tra forza F e deformazione ξ , si ha subito, ricordando (parag.2) il significato del coefficiente di compressibilità ϵ :

$$h = \frac{F}{\xi} = \frac{\rho S^2}{\frac{S \xi}{V} V} = \frac{\epsilon S^2}{V} .$$

Un filtro passa-basso si ottiene, ad es. connettendo masse ed elasticità come in fig. 5. Analogamente al filtro elettrico la frequenza di taglio è:

$$f_t = \frac{1}{\pi \sqrt{L C}} = \frac{1}{\pi \sqrt{m/h}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}} \frac{S}{V l} = \frac{c}{\pi} \sqrt{\frac{S}{V l}} \quad (23)$$

§ 8 - Adattamento di impedenze acustiche.

Poichè la resistenza acustica specifica ρc della aria è molto minore della impedenza specifica che si oppone alla vibrazione di un pistone, il rendimento della trasformazione di energia meccanica in energia acustica è sempre assai basso. E' possibile, con un semplice accorgimento pratico, effettuare un adattamento di impedenza tale da aumentare notevolmente il rendimento.

Sia S_2 (fig. 6) la sezione di un condotto indefinito

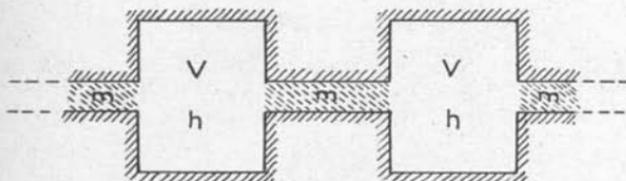


Fig. 5

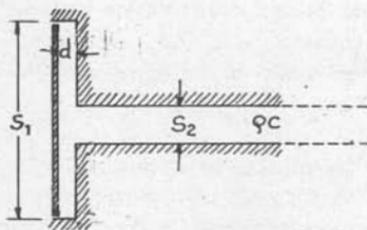


Fig. 6

a pareti rigide contenente il mezzo di resistenza acustica specifica ρc ed $S_1 > S_2$ la superficie del pistone vibrante, collegato al condotto per mezzo della camera V di spessore d piccolo di fronte alle lunghezze d'onda in giuoco.

Ponendo la continuità della portata attraverso la imboccatura del condotto, ed, in prima approssimazione l'incompressibilità del mezzo nella camera V , si ricava

che il rapporto ha pressione e velocità che esercita il mezzo sulla S_1 è:

$$\frac{p}{\xi_1} = \rho c \frac{S_1}{S_2}$$

L'impedenza specifica di radiazione sotto cui vibra il pistone è maggiore di quella del mezzo libero, nel rapporto S_1/S_2 .

Non si deve però credere che si possa dare al rapporto S_1/S_2 valori elevatissimi.

S_2 infatti non può essere troppo piccolo altrimenti lo spostamento ξ_2 assume valori così elevati da aumentare intollerabilmente le perdite per attrito sulle superfici laterali del condotto. S_1 , non può essere per contro troppo elevato per non dar luogo a vibrazioni di parti della membrana in opposizione di fase (separate da linee nodali) con conseguente diminuzione della potenza radiata.

In pratica in aria S_2 non può essere inferiore all'ordine di grandezza del centimetro quadrato ed S_1 non può essere oltre il centinaio di centimetri quadri. Perciò la ξ può al massimo raggiungere 100 ÷ 200 volte la resistenza acustica specifica del mezzo libero ρc .

Se il condotto è di lunghezza finita e sbocca nel mezzo libero, si hanno fenomeni di risonanza alle frequenze in cui la lunghezza del condotto è multipla dispari di $\lambda/4$ e, se D è assai minore di λ solo una parte della potenza esce dal condotto. Per evitare questo fenomeno e far sì che praticamente tutta la potenza venga erogata nel mezzo libero, occorre sostituire al condotto cilindrico un condotto esponenziale il quale adatti gradualmente l'onda sonora in sezioni sempre più ampie fino a confondersi col mezzo libero, purché il diametro D della bocca non sia inferiore alla lunghezza di onda $\lambda/4$ e quindi non dia luogo a riflessioni apprezza-

bili dell'onda sonora in corrispondenza della bocca stessa.

§ 9 - Vibrazione di un pistone rigido

Si consideri un pistone rigido circolare di superficie $S = \pi R^2$, affacciato ad una parete rigida indefinita che limita un semispazio contenente un mezzo di resistenza acustica ρc . Se il pistone è sollecitato da una forza alternativa $F = pS \cos \omega t$, assume una velocità ξ' , in generale sfasata rispetto a F , tale che l'impedenza specifica offerta dal mezzo alla vibrazione del pistone:

$$\frac{p}{\xi'} = \frac{F}{S\xi'} = \frac{p}{\xi'} = \rho c (\alpha + j\beta)$$

è di valore complesso.

Dallo studio del fenomeno si trova che le componenti α e β sono espresse dai diagrammi di fig. 7.

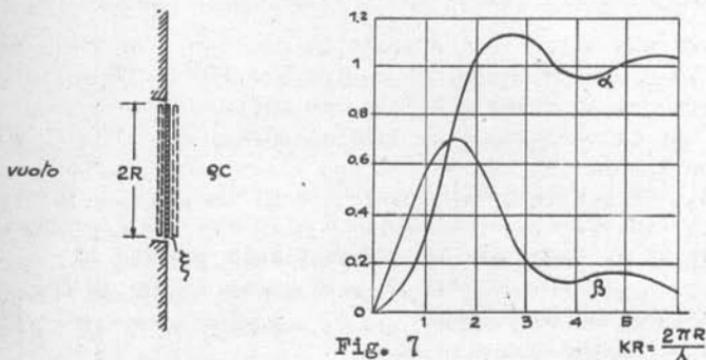


Fig. 7

$$KR = \frac{2\pi R}{\lambda}$$

Fino ad una certa frequenza, tale grossolanamente che sia $D/\lambda = 0,5$, la parte reale dell'impedenza è circa di andamento parabolico e la parte reattiva è circa lineare al crescere della frequenza. Il fatto che esista

PAOLINI - Acustica ed Elettroacustica 3

una componente reattiva di impedenza proporzionale alla frequenza cioè del tipo ωm , significa che la presenza del mezzo da luogo ad una massa aggiuntiva costante che si chiama massa covibrante, la quale si aggiunge a quella propria del pistone.

Se il pistone fosse libero nello spazio, cioè senza parete rigida, il problema sarebbe sostanzialmente diverso, ed i risultati della trattazione ora svolta verrebbero solo come approssimazione.

Nelle applicazioni acustiche ricorrono spesso fenomeni assimilabili al caso classico del pistone vibrante, che appunto per ciò è stato qui riportato.

Se il pistone emette un'onda sonora delle due parti nello stesso mezzo di resistenza ρc il valore dell'impedenza deve essere raddoppiata, purchè naturalmente sussista la parete rigida indefinita di divisione tra i due semispazi alla quale il pistone stesso è affacciato.

Le due onde sonore hanno opposizione di fase e quindi la parete rigida è indispensabile per evitare fenomeni di interferenza. Se la parete pur essendo rigida, non è indefinita, nasce una interferenza tra i suoni emessi dalle due parti, tanto più importante quanto più la lunghezza d'onda risulta non trascurabile di fronte alle dimensioni geometriche della parete, che prende il nome di "baffle".

-----o o o o o-----
 ^o