

## ALTERNATORE PENDOLARE ELETTROMAGNETICO.

PROF. A. STEFANINI.

Le correnti alternate di media frequenza si possono ottenere, com'è noto, con apparecchi rotativi di varia forma, fra i quali due dei più semplici sono la sirena elettrica del Wien <sup>1)</sup> e l'alternatore Siemens-Halske <sup>2)</sup>.

Per servirsi di questi apparecchi occorre mantenere in rotazione, con velocità costante, ma via via diversa a seconda della frequenza che si desidera nelle alternazioni della corrente, o un disco d'ottone munito di listerelle equidistanti di ferro, o una ruota dentata di ferro, che si muovono di fronte ad un' elettrocalamita.

Tali alternatori rendono utilissimi servizi nella fisica per tutte quelle misure che richiedono l'uso di correnti alternate di frequenza un poco elevata; ma essi mal si prestano quando si voglia cambiare rapidamente la frequenza, e quando in prove successive, che debbano succedersi a più o meno brevi intervalli di tempo, occorre adoperare una medesima frequenza, o frequenze che stieno fra loro in dati rapporti.

Queste difficoltà, e il prezzo non indifferente degli apparecchi rotativi a corrente elettrica, rendono poi in particolar modo praticamente inapplicabili tali alternatori all'acumetria, che richiede apparecchi atti a produrre facilmente, e con sicurezza, rumori e suoni di altezza diversa, possibilmente senza dover ricorrere alla corrente elettrica generata da pile o da accumulatori, nè a quella che serve per la illuminazione.

Ma poichè per l'acumetria, e per la massima parte delle misure elettriche, non è necessario usare suoni, o correnti alternate, di lunga durata, è inutile ricorrere ad apparecchi rotativi; ed ho quindi ideato di affidare ad un pendolo il

<sup>1)</sup> *Ann. d. Physik.* 4, p. 425, 1901.

<sup>2)</sup> Siemens-Halske A. G. *Preisliste* 56, X, p. 27.

compito di mettere in moto più o meno rapido davanti ad un elettromagnete una serie di lamine di ferro equidistanti come nella sirena del Wien, o un arco dentato di ferro come nell'alternatore Siemens-Halske. Dalla distanza fra i denti o fra le lamine di ferro e dalle dimensioni e dall'altezza della caduta del pendolo dipenderà evidentemente la frequenza della corrente alternata che si otterrà pel passaggio delle masse di ferro in vicinanza dei nuclei dell'elettromagnete. Tale frequenza si potrà quindi far variare entro limiti assai estesi, adottando per le diverse parti dell'apparecchio dimensioni opportune e si potrà ottenere con sicurezza una medesima frequenza quante volte di seguito si desidera, lasciando cadere il pendolo sempre da una medesima altezza.

Le figure 1 e 2 mostrano di faccia e di fianco l'alternatore a pendolo con arco dentato di ferro.

L'arco  $DD'$  è fissato all'estremità inferiore di un'asta  $R$  di legno, o di alluminio, girevole attorno all'asse orizzontale  $O$  sostenuto dalla staffa  $M$ , che si trova alla parte superiore di un robusto sostegno  $AA' BB'$  di legno.

La lunghezza del pendolo  $OR$  deve esser tale che la distanza fra l'asse e la periferia dell'arco dentato di ferro dolce  $DD'$  sia esattamente uguale al raggio di curvatura di questo arco, in modo che ogni dente passi esattamente alla stessa distanza dai nuclei  $a, b$ , dell'elettrocalamita. Per poter ottenere ciò con facilità, l'asta  $R$  è formata di due parti,  $OL$ ,  $PR$ , che possono scorrere l'una sull'altra, e che si fissano poi solidamente con le viti  $v, v'$ . Per centrare esattamente l'arco dentato, serve la sbarretta  $Z$  imperniata all'estremo  $D'$  dell'arco e scorrevole mediante la scanalatura  $E$  sulla porzione  $RP$  del pendolo.

L'elettrocalamita è fissata su una tavoletta  $T'$  con la traversa  $H$ , e questa tavoletta può scorrere, mediante la vite  $V$ , sull'altra tavola  $T$  fissata al sostegno. In tal modo si può far variare a volontà l'intraferro, per rendere più o meno intense le correnti alternate.

Tale elettrocalamita è formata da lamine di ferro dolce (o di stalloy)  $aa'$ ,  $bb'$  tenute fortemente strette ai nuclei di una calamita permanente  $NS$  o da appositi buloni in ferro,

o da un avvolgimento di filo di rame coperto di seta. Questo avvolgimento può servire a rinforzare, con la corrente di una

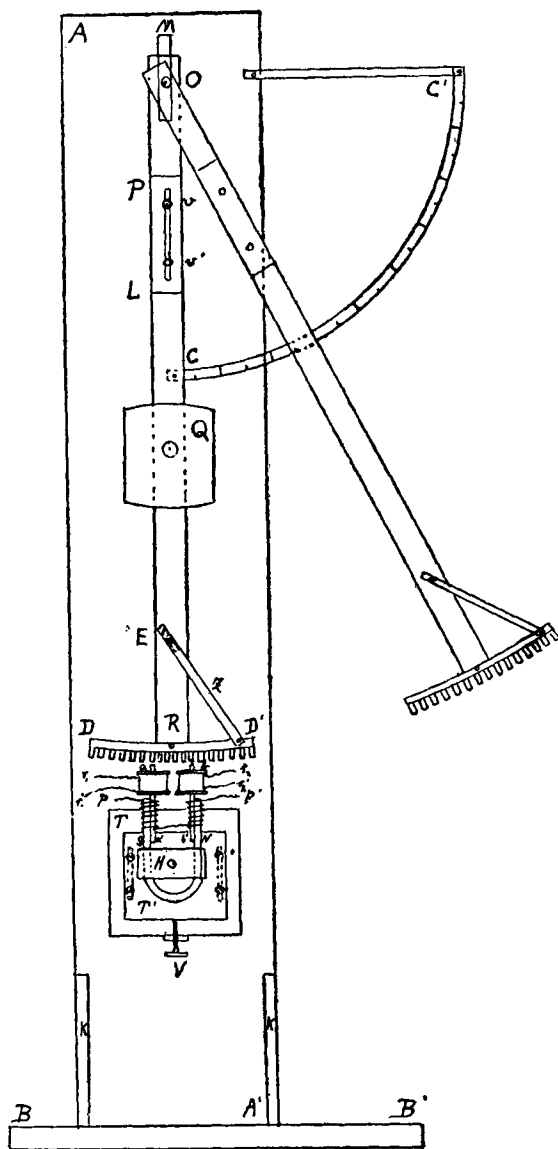


Fig. 1.

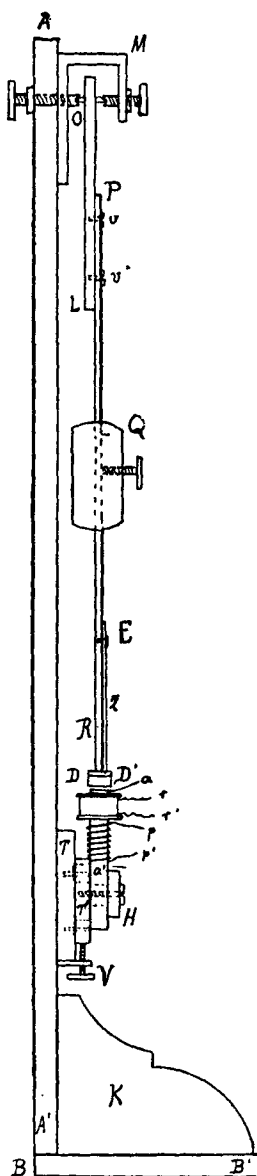


Fig. 2.

pila o di un accumulatore, il campo magnetico nei casi in cui si vogliano ottenere correnti alternate più intense. Le

lamine di ferro  $a a'$ ,  $b b'$  son circondate da due rocchetti di filo fine, con avvolgimenti uguali, i cui capi  $r_1, r'_1, r_2, r'_2$  si potranno riunire fra loro o tener separati, secondo i casi.

Il pendolo si muove di fronte ad un arco graduato  $C C'$ , che permette di farlo cadere dall'altezza voluta.

La figura 3 mostra come si deve disporre l'elettromagnete per adoperare la serie di lamine equidistanti di ferro, come nella sirena elettrica del Wien.

Per determinare le dimensioni che si debbon dare alle diverse parti dell'apparecchio onde ottenere una data frequenza della corrente alternante, o la frequenza che si potrà ottenere con date dimensioni, occorre trovare la velocità dei punti periferici dell'arco dentato.

Sia  $r = O g$  la distanza (fig. 4) dal centro di gravità di tutto il pendolo dall'asse  $O$  di rotazione. La velocità angolare  $\omega$  corrispondente all'istante nel quale il pendolo passa per la posizione verticale dopo che si è lasciato cadere da un'altezza cui corrisponde l'angolo  $\alpha$  di spostamento iniziale è

$$(1) \quad \omega = 2 \cdot \sqrt{\frac{P r}{\mu}} \sin \frac{\alpha}{2}$$

ove  $P$  è il peso del pendolo e  $\mu$  il suo momento d'inerzia rispetto all'asse di rotazione  $O$ .

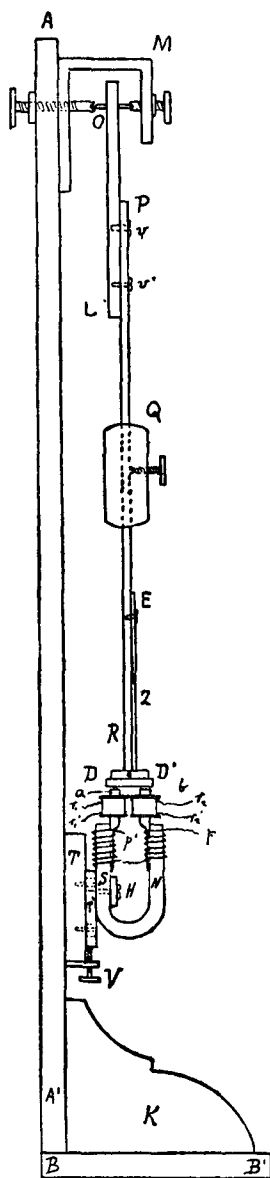


Fig. 3.

Se  $r_1$  è la distanza dei punti periferici dell'arco dentato dall'asse O la loro velocità  $v_1$  sarà

$$(2) \quad v_1 = \omega r_1 = 2 r_1 \sqrt{\frac{P r}{\mu}} \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}.$$

Se si forma il pendolo con una massa Q assai grande rispetto a quella dell'arco dentato (vedi fig. 1, 2, 3) e tale massa è scorrevole sull'asta OR, la velocità con la quale il centro di gravità del pendolo passa per la posizione verticale si può ottenere dalla formola

$$(3) \quad v = \sqrt{2 g h}$$

essendo  $g$  l'accelerazione della gravità ed  $h$  l'altezza verticale da cui cade il centro di gravità. Ma poichè per uno spostamento angolare  $\alpha$  si ha

$$h = r(1 - \cos \alpha)$$

ove  $r$  è la distanza del centro di gravità dal punto O, si avrà, sostituendo nella precedente,

$$(4) \quad \begin{aligned} v &= \sqrt{2 g r (1 - \cos \alpha)} \\ &= 2 \sqrt{g r} \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}. \end{aligned}$$

La velocità  $v_1$  dei punti A situati alla distanza  $r_1$  da O sarà invece

$$v_1 = \frac{r_1}{r} v$$

ossia

$$(5) \quad v_1 = \frac{2 r_1 \sqrt{g}}{\sqrt{r}} \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}.$$

Da questa formola si vede che per ottenere una velocità grande dei punti periferici converrà tenere assai alto il centro

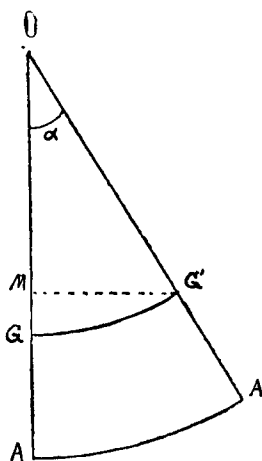


Fig. 4.

di gravità e far lungo il raggio  $r_1$  dell'arco dentato; ma si vede ancora che sul valore di  $v_1$  influisce più  $r_1$  che  $r$ . Per ragioni di comodità non converrà peraltro fare  $r_1 > 1$  metro, e quindi converrà distribuire le masse del pendolo in modo da alzare il più possibile il suo centro di gravità.

Se invece non si applica al pendolo la massa  $Q$  e si suppone che tutta la massa in moto sia costituita esclusivamente da quella  $M$  dell'arco dentato di raggio  $r$ , nella (2) si dovrebbe porre  $\mu = Mr^2$ ,  $r_1 = r$  e si otterrebbe

$$(6) \quad v_1 = 2\sqrt{gr} \sin \frac{\alpha}{2}$$

che coincide con la (5) nella quale si ponga  $r_1 = r$ .

Le larghezze dei denti e dei vani dell'arco di ferro si faranno ordinariamente uguali allo spessore dei nuclei. Sia  $d$  la distanza fra i centri di due denti (fig. 5): il passaggio da un dente al successivo di fronte al centro del nucleo si farà in un tempo  $t$  dato da

$$d = v_1 t,$$

Fig. 5. ed evidentemente  $t$  sarà il periodo delle correnti alternate che si avranno con la velocità  $v_1$ . Indicando perciò con  $n$  il numero delle alternazioni si avrà:

$$(7) \quad n = \frac{2v_1}{d}.$$

Se indichiamo con  $K$  la parte che nel coefficiente di  $\sin \frac{\alpha}{2}$  nelle formole (2), (5) e (6) dipende soltanto dalle dimensioni del pendolo, la (7) si può scrivere

$$(8) \quad n = \frac{2K}{d} \sin \frac{\alpha}{2},$$

e si vede che la frequenza delle correnti alternate, che si avranno pel passaggio del pendolo di fronte all'elettrocala-

mita, è proporzionale al seno della metà dell'angolo che il pendolo forma con la verticale al momento in cui si lascia cadere e inversamente proporzionale alla distanza fra due denti dell'arco.

Se nel circuito della elettrocalamita s'incluse un telefono, o direttamente o per mezzo di un piccolo trasformatore, la nota musicale che si udirà sarà dovuta ad un numero

$$(9) \quad N = \frac{n}{2} = \frac{K}{d} \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}$$

di vibrazioni doppie al secondo.

Si potranno dunque, una volta determinato il valore di  $K$ , segnare sull'arco  $CC'$  (fig. 1) i punti dai quali far cadere il pendolo, per avere la frequenza che si desidera.

Il numero dei denti dell'arco dentato, o delle lamelle di ferro che si fisseranno al pendolo, dovrà essere scelto in modo che durante l'intero passaggio di fronte all'elettro-magnete la velocità resti sensibilmente costante. Nel modello costruito con la disposizione della fig. 1 ho adoperato 38 denti, ciascuno dei quali ha lo spessore di mm. 2,25. È utile che i primi e gli ultimi denti sieno leggermente smussati, per eliminare l'urto istantaneo che subirebbe la membrana telefonica al passaggio del primo dente davanti al nucleo dell'elettrocalamita. La sezione dell'arco dentato ha le dimensioni  $10 \times 30$  mm., e l'asta del pendolo è lunga 75 cm. Poichè tale asta è di legno sottile, pel calcolo della velocità periferica, potendosi ritenere che tutta la massa in moto sia soltanto quella dell'arco di ferro, si potrà usare la (6); quindi la frequenza  $N$  delle correnti alternate che si avranno per la caduta del pendolo dall'angolo  $\alpha$  sarà

$$(10) \quad N = \frac{2 \sqrt{g r}}{d} \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}.$$

Ponendo in questa

$$g = 980 \frac{\text{cm.}}{\text{sec}^2} \quad r = 75 \text{ cm.} \quad d = 0,45 \text{ cm.}$$

si ottiene

$$(11) \quad N = 1205 \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} .$$

Per la caduta dalla posizione orizzontale

$$\left( \alpha = 90^{\circ}, \quad \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} = 0,707 \right)$$

si dovrà dunque avere

$$N_{90} = 1205 \times 0,707 = 852 .$$

È questo il valore massimo ottenibile per la frequenza con questo modello, se non si voglia far cadere il pendolo da un angolo maggiore di  $90^{\circ}$ .

Per verificare la formola (11) ho registrato col metodo degli anelli di fumo del Marbe <sup>1)</sup> le vibrazioni della lamina del telefono incluso nel circuito dell'elettrocalamita, per diverse altezze di caduta del pendolo. Insieme a tali vibrazioni venivano registrate quelle di un diapason cronografico (100 v. d.). Era quindi facile misurare con precisione la frequenza delle correnti alternanti ottenute; mentre ciò sarebbe stato impossibile con la valutazione ad orecchio della nota che si ode al telefono.

La determinazione della frequenza sarebbe evidentemente possibile a farsi con un oscillografo; ma il metodo degli anelli di fumo è assai più comodo fino a che pei valori della frequenza si resta al di sotto di 1000.

Ecco i risultati ottenuti:

<sup>1)</sup> *Physik. Zeitschr.* 8, p. 92, 1907.



Angolo $\alpha$ di caduta del pendolo	Valori della frequenza N	
	calcolati $N = 1205 \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}$	osservati con gli anelli di fumo
11°	115	113
36°	372	371
61°	604	594
90°	852	841

L'accordo fra i valori calcolati e quelli osservati è tale, da ritenere abbastanza approssimata per gli usi comuni la formola (10).

In un altro modello, costruito sul tipo della fig. 3, le dimensioni sono :

$$r = 100 \text{ cm.} \quad d = 0,2 \text{ cm.}$$

e quindi il valore della frequenza è dato da

$$N = 3103 \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2},$$

da cui

$$N_{90^\circ} = 2214.$$

Portando molto alto il centro di gravità del pendolo, in modo da ridurre per es. a metà la durata di oscillazione, ma conservando la lunghezza di un metro per l'arco che porta la serie di lamelle di ferro, si potrà raddoppiare il valore della frequenza massima ottenibile, e giungere a quella di circa 5000, ossia a 10000 alternazioni al secondo.

Perchè la corrente alternata sia il più possibile vicina alla forma sinusoidale e il suono che si può avere col telefono sia il più puro possibile, si potrebbero dare ai denti dell'arco e ai nuclei dell'elettromagnete le forme a ciò più opportune, indicate dai recenti trattati di elettrotecnica. Ma

si può ottenere abbastanza bene tale intento includendo nel circuito un condensatore, scelto in modo che, con l'autoinduzione che si ha nel circuito, si abbia la così detta risonanza elettrica per la frequenza  $n$  che si desidera. Se  $C$  è la capacità del condensatore ed  $L$  l'autoinduzione si avrà risonanza per la frequenza  $n$  tale che sia

$$(12) \quad 2 \pi n L = \frac{1}{2 \pi n C} .$$

Saranno quindi eliminate o ridotte a un'intensità trascurabile le armoniche, e il periodo del suono pel quale si avrà la risonanza sarà

$$(13) \quad T = \frac{1}{n} = 2 \pi \sqrt{LC} .$$

L'uso del condensatore serve ad aumentare notevolmente l'intensità della corrente alternata della frequenza corrispondente e del suono che si ode col telefono.

La capacità del condensatore dovrà evidentemente variare col periodo; ma per la pratica non occorre che essa sia esattamente aggiustata, perchè una capacità ottima con un dato periodo può servire utilmente anche per periodi alquanto inferiori o superiori.

L'azione della capacità si riconosce benissimo col telefono, se si lascia cadere il pendolo da un'altezza superiore a quella cui corrisponde il periodo della risonanza. Mano a mano che il pendolo diminuisce di ampiezza nella sua oscillazione, ad ogni passaggio davanti all'elettrocalamita si ode un suono, che dapprima, essendo ricco di armonici, è rauco e poco intenso, ma che va gradatamente crescendo d'intensità e di purezza, fino a raggiungere un'intensità massima e un carattere nettamente musicale per la frequenza per la quale il circuito è in risonanza. Continuando ad ascoltare il suono quando le oscillazioni del pendolo diminuiscono ancora di ampiezza, il suono si fa nuovamente più debole e meno musicale.

Si può riconoscere assai bene per quale frequenza le condizioni del circuito soddisfano alla relazione (12) della risonanza, anche introducendo nel circuito un galvanometro di Einthoven a filo teso. L'ampiezza di oscillazione del filo (che si può osservare direttamente col microscopio, o che si può proiettare su uno schermo) passa per un massimo allorchè, per le successive oscillazioni, il pendolo assume la velocità corrispondente alla frequenza per la quale il circuito è aggiustato. L'esperienza riesce in questo caso assai bene per le basse frequenze, perchè allora è più facile seguire con l'occhio le oscillazioni del filo galvanometrico.

Bastano ordinariamente le capacità che possono ottenersi combinando opportunamente quelle di 4 o 5 condensatori industriali della Casa Siemens-Halske (della capacità da 0,1 a 1 o 2 m. f. a seconda del telefono che si adopra) per avere una buona risonanza per tutti i periodi che si possono avere coll'alternatore a pendolo.

Quando si adoperi la capacità conveniente il suono che si ottiene al telefono, oltre che più intenso è notevolmente più puro; e fotografando la curva della corrente alternata col galvanometro Einthoven si riconosce che essa è molto approssimativamente sinusoidale.

L'introduzione in circuito della capacità via via occorrente può farsi eseguire automaticamente dall'apparecchio con la disposizione della fig. 6.

Lungo un arco concentrico a quello che porta la graduazione si trovano, a intervalli opportuni, alcune leve  $L_1, L_2, L_3, \dots$  che posson muoversi limitatamente fra due ostacoli vicini. All'estremità rivolta verso l'esterno ciascuna leva porta una molla elastica (ricoperta da un tubo di gomma per impedire rumori che disturberebbero l'ascoltazione al telefono) e il pendolo porta un dente D che, al suo passaggio, fa spostare ciascuna leva a destra durante la salita, e a sinistra durante la discesa. Un attrito conveniente impedisce alle leve il ritorno spontaneo indietro; ma questo ritorno è provocato dai passaggi del pendolo, perchè la molla, dopo che il pendolo è passato, torna a collocarsi sul di lui cammino.

I condensatori  $C_2, C_3 \dots C_5$  hanno una delle loro armature riunite a uno dei contatti  $p_2, p_3 \dots p_5$  contro cui si appoggiano le leve quando il pendolo le sposta salendo. Le leve sono unite tutte metallicamente fra loro e con un'armatura

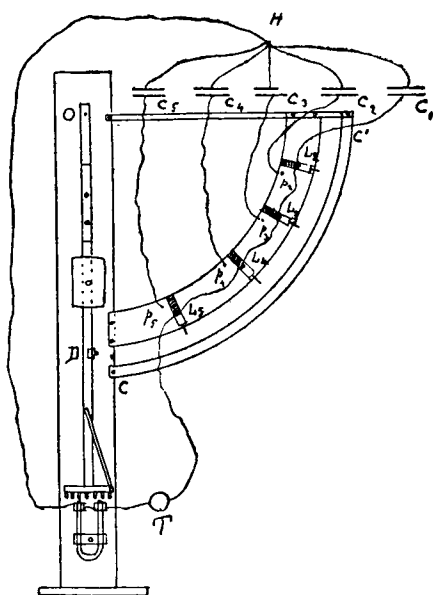


Fig. 6.

del condensatore  $C_1$ . Le altre armature di tutti i condensatori fanno capo a un punto H che comunica con uno dei reofori dell'elettromagnete, e pel telefono il circuito termina col filo che riunisce tutte le leve.

Il pendolo quando sale pone in circuito tutti i condensatori che sono in comunicazione con le leve che sposta; ma discendendo toglie dal circuito quelli corrispondenti alle leve che si trovano alla sua sinistra; talchè quando il pendolo passa di fronte all'elettromagnete si ha nel circuito la capacità che più conviene per la velocità che possiede. Basta quindi aver l'avvertenza di portare tutte le leve sui loro contatti prima di mettere in moto il pendolo, perchè, se le capacità dei singoli condensatori sono state scelte conveniente-

mente, per ogni altezza da cui il pendolo si fa cadere si abbia inserita automaticamente la capacità più opportuna per la risonanza. Come si vede dalla figura, la capacità del condensatore  $C_1$  è sempre inclusa nel circuito.

Per ricerche acumetriche e fisiologiche questo metodo d'inserzione automatica della capacità può essere poco adatto, a motivo del rumore provocato dai colpi del pendolo contro le leve inseritrici.

Si può allora adottare un'altra disposizione che consiste nel sostituire alle leve dei contatti a spina, essi pure distribuiti lungo lo stesso arco. Il dente  $D$  che serviva a spostare le leve, urta allora contro le spine che sono inserite nei fori corrispondenti, e il pendolo può oscillare soltanto con un'ampiezza inferiore a quella che corrisponde alla spina che si trova inserita nel foro più prossimo alla posizione di riposo. Se adunque prima di porre il pendolo in oscillazione si inseriscono tutte le spine, in modo cioè che nel circuito sia contenuta la capacità massima disponibile (somma delle capacità dei singoli condensatori), per le ampiezze inferiori a quella consentita dalla prima spina, che è la più bassa, si avrà in circuito la capacità massima, che appunto è quella che occorre per le velocità più piccole; se si vuol avere nelle correnti alternate una frequenza maggiore bisogna far cadere il pendolo da un'altezza maggiore, e ciò non si può fare se non si toglie la spina più bassa; ma allora la capacità diminuisce, come appunto si richiede. E per avere la velocità massima occorre togliere tutte le spine, e lasciare quindi in circuito la sola capacità  $C_1$ , che è la più piccola fra tutte.

\* \* \*

Le correnti alternate così ottenute si prestano evidentemente per tutte le misure che di solito si fanno mediante le correnti fornite dai comuni alternatori rotativi, con quelle indotte dei rocchetti di Ruhmkorff, o con quelle interrotte da diapason elettromagnetici nei metodi ben noti nei quali si usa il ponte di Wheatstone o in altri analoghi.

Ho riconosciuto, ad esempio, che nella misura delle resistenze si giunge ad ottenere al telefono il silenzio assoluto,

mentre coll'uso del rocchetto di Ruhmkorff si ha soltanto un minimo nell'intensità del suono. Ciò dipende dal fatto che con l'alternatore si può avere una corrente quasi sinusoidale, di un sol periodo; mentre col rocchetto d'induzione le correnti sono molto complesse, e se l'equilibrio nel ponte si ha per la fondamentale, ad es., non si ha per le armoniche.

Recentemente il Wien <sup>1)</sup> ha proposto di produrre le correnti alternate con la scarica di un condensatore in un circuito provvisto di opportuna autoinduzione, e di rinforzare con adatti risonatori sferici il suono che tali scariche producono in un telefono; e il Brünings <sup>2)</sup> si servi di tali correnti a scopo acumetrico. Ma con questa disposizione è necessaria una corrente continua a 110 o 220 volts per caricare il condensatore, e si richiede un aggiustamento di capacità e di autoinduzione nei circuiti di scarica, e di risonanza acustica nel telefono, particolare per ciascuna frequenza.

Con l'alternatore pendolare invece tutto ciò si raggiunge assai più facilmente; e sarà quindi agevole riconoscere, con le correnti che esso fornisce, se la resistenza degli elettroliti dipende effettivamente dalla frequenza delle correnti alternate che si adoprano per misurarle, come resulterebbe dalla anzidetta comunicazione del Wien.

Se fosse possibile determinare con esattezza il periodo pel quale si ha la risonanza, la formola

$$(14) \quad T = 2\pi \sqrt{LC}$$

servirebbe a trovare l'autoinduzione del circuito quando fosse nota la capacità, o viceversa.

Ma se non si tratta di eseguire delle misure, ma si voglia solo qualitativamente mettere in evidenza gli effetti della capacità e dell'autoinduzione sulle correnti alternate, si può usare direttamente l'alternatore con un telefono o con un oscillografo; perchè la risonanza corrisponde al periodo pel

<sup>1)</sup> *Physikal. Zeitschr.* 13, pag. 1034, 1912.

<sup>2)</sup> Verh. d. deut. Otologischen Gesellsch. auf des 22 Vers. in Stuttgart, 1913.

quale l'intensità del suono che si ode al telefono, o l'ampiezza di oscillazione dell'oscillografo, assumono il massimo valore.

A scopo di dimostrazione didattica si può usare come oscillografo un galvanometro Einthoven, il cui filo teso si proietta su uno schermo. Per seguire facilmente l'oscillazione del filo, conviene scegliere una frequenza assai bassa. Ad es: si può aggiustare autoinduzione e capacità perchè la (14) sia verificata per un dato valore di  $T$  compreso fra quelli che si possono avere da oscillazioni del pendolo inferiori a  $10^\circ$ . Allora, facendo cadere il pendolo da  $10^\circ$ , si vede l'ampiezza di oscillazione del filo crescere gradatamente, assumere un valore massimo per un dato periodo, e diminuire poi successivamente.

Col telefono si ode distintamente divenire assai più intenso e più puro il suono per ampiezze di oscillazione comprese entro limiti assai ristretti, per ciascuna coppia di valori di  $L$  e di  $C$ . Quando, per es., la capacità è troppo grande o troppo piccola in confronto al valore di  $L$  e di  $T$ , il suono è debole e rauco; mentre per valori aggiustati, pei quali cioè la (14) è soddisfatta, diviene musicale e intenso.

Con l'alternatore a pendolo si può mostrare facilmente l'influenza che una differenza di fase esercita nella composizione di due correnti alternate.

Se si adopera l'arco dentato, affinchè le correnti che si inducono nei due nuclei dell'elettrocalamita sieno in concordanza di fase, occorre che i denti dell'arco passino contemporaneamente sopra i due nuclei, e quindi che la distanza fra i centri dei nuclei sia esattamente uguale alla distanza fra i centri dei denti dell'arco. Adoprando la serie di lamine equidistanti di ferro, occorre che le lamine sieno esattamente nel piano di oscillazione e che le linee mediane dei due nuclei dell'elettrocalamita sieno nello stesso piano verticale che passa per l'asse attorno al quale oscilla il pendolo, o in uno dei piani che passano per tale asse. Occorre, cioè, nei due modelli dell'alternatore, che ambedue i nuclei si trovino contemporaneamente in corrispondenza di due denti dell'arco o di una delle lamine di ferro.

È facile costruire le elettrocalamite in modo che, con viti di richiamo, si possa variare a volontà la distanza o la situazione relativa dei nuclei; ed allora, facendo comunicare i quattro capi degli avvolgimenti dei due rocchetti a 4 dei 6 pozzetti di un pachitropo, e quelli del circuito telefonico ad altri due pozzetti, è facile riconoscere che, quando le correnti indotte nei due rocchetti sono in concordanza di fase, se esse si fanno arrivare nel medesimo senso al telefono il suono è molto intenso, mentre è debolissimo se vi arrivano in direzioni opposte. In questo caso il suono sarebbe nullo se i due rocchetti fossero in tutto identici; ma anche se gli avvolgimenti son fatti col medesimo numero di spire, è impossibile evitare le differenze dovute al ferro dei nuclei, che difficilmente potranno essere magneticamente affatto uguali.

Se, dopo aver ottenuto le due correnti in concordanza di fase, si cambia leggermente la distanza o la disposizione dei due nuclei dell'elettrocalamita, è facile riconoscere che l'intensità del suono al telefono (o l'ampiezza di oscillazione dell'oscillografo) cambia ben poco se s'inverte la direzione di una delle due correnti. Non si ha alcun cambiamento coll'inversione, se la differenza di fase è di  $90^\circ$ .

Ciò fornisce una dimostrazione sperimentale, assai semplice, dei noti teoremi sulla composizione delle correnti sinusoidali.

Per mandare nel telefono le correnti fornite dai due rocchetti nella stessa direzione o in direzioni opposte, invece del pachitropo di Pohl ho trovato più conveniente la disposizione della fig. 7. In un disco circolare di legno, o di ebanite, sono scavati otto pozzetti, dei quali i quattro contrassegnati coi numeri 1, 2, 3, 4 servono per le comunicazioni coi reofori dei due rocchetti  $E_1$ ,  $E_2$ , dell'elettrocalamita; gli altri quattro segnati con  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , sono vuoti. Un disco di ugual diametro porta quattro fili di rame amalgamati, disposti in modo che possan servire a riunire contemporaneamente i pozzetti 1 con 4, 2 con 3,  $a$  con  $c$ ,  $d$  con  $b$ . È facile vedere che a seconda del modo col quale questo disco si pone sull'altro, i circuiti di  $E_1$  e di  $E_2$  si possono adoperare in modo:



- 1) che sieno percorsi dalla corrente nello stesso senso (posizione I);
- 2) che sieno percorsi in sensi contrari (posizione II);
- 3) che il circuito di  $E_1$  sia separato da quello di  $E_2$  (posizione III).

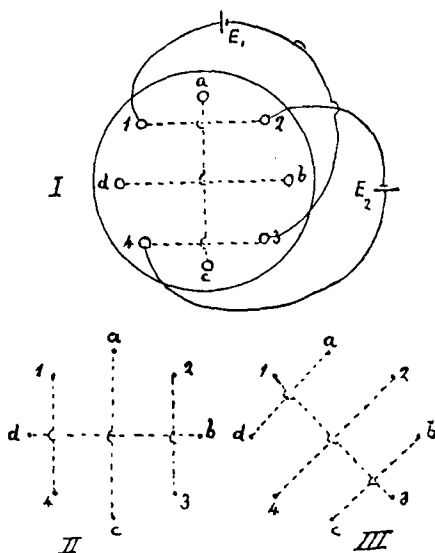


Fig. 7.

Inserendo un telefono in ciascun circuito, si potrà facilmente con questo dispositivo studiare la composizione delle due correnti, o studiarle separatamente.

In questa maniera si riconosce facilmente l'influenza che può avere nella percezione simultanea coi due orecchi una differenza di fase o d'intensità dei due suoni di ugual tonalità. Ad es. se i due suoni sono di uguale intensità, si percepisce un suono unico in mezzo alla testa: se sono di intensità diversa, il suono è latelarizzato all'orecchio che riceve il suono più intenso.

Si può riconoscere anche la reazione che uno dei rocchetti esercita sulle correnti che si producono nell'altro; infatti, quando il commutatore è nella posizione III, se si tiene

ad un orecchio uno dei telefoni, si avverte una marcata differenza nel carattere del suono che si ascolta, allorchè si apre o si chiude il circuito dell'altro rocchetto; e ciò tanto più sensibilmente, se la chiusura si fa con un contatto discontinuo, ad es. strisciando fra loro i fili di rame che formano i capi del circuito. Il massimo dell'intensità si ha quando il secondo circuito è aperto.

\* \* \*

Oltre che per le misure fisiche l'alternatore pendolare può servire nelle ricerche acumetriche, fisiologiche e in quelle che hanno rapporto con la fonetica.

Per ciò che si riferisce all'acumetria, è anzi tutto da notare che se il pendolo si fa cadere dalla massima altezza ( $\alpha = 90^\circ$ ) e si lascia libero di oscillare, mano a mano che la sua ampiezza va diminuendo, il suono che si ascolta al telefono cambia di tonalità, divenendo sempre più grave.

Nel modello da me costruito, prima di fermarsi il pendolo compie circa 130 oscillazioni, e dalla prima nota di circa 2200 v. d. si arriva gradatamente a quella di circa 30 v. d. con 130 intervalli che, naturalmente, non sono fra loro tutti uguali.

Questa possibilità di ottenere una serie così numerosa di note costituisce un pregio notevole di questo apparecchio, per i servigi che può rendere nella otologia per la determinazione delle così dette lacune acustiche nell'audizione. È noto che vi sono affezioni del labirinto nelle quali, per distruzione, atrofia o altre lesioni di alcune parti della membrana basilare, alcuni individui non hanno la percezione di alcune fra le note musicali comprese fra i due limiti della percettibilità. Per determinare tali lacune si usa attualmente la così detta serie di Bezold, consistente in un grande numero di diapason. Profittando dell'alternatore pendolare, tale serie può essere ridotta soltanto ai diapason molto acuti, che danno cioè i suoni di altezza superiore alla massima che può aversi con l'alternatore.

Nella porzione di scala musicale abbracciata dall'alternatore a pendolo, la ricerca delle lacune acustiche si potrà

peraltro fare con una ricchezza di note impossibile a ottenersi praticamente coi diapason e in un tempo brevissimo, cioè al più in tre minuti.

Quando si voglia usare l'alternatore a pendolo per determinare l'acuità uditiva, gioverà scegliere tre o quattro note fra quelle che si possono ottenere dalla caduta del pendolo (ordinariamente si scelgono quelle di 64, di 512 e di 2000 v. d.) e si regolerà per ciascuna di esse la capacità del circuito, in modo che risultino il più possibile pure e musicali.

Allora non resta che graduare per ciascuna l'intensità del suono che si può avere al telefono, in modo che da quella relativa alla soglia dell'eccitazione per un orecchio normale si arrivi ad un'intensità assai grande, circa 1000 o 2000 volte la soglia.

Per tale graduazione si può ricorrere ad una disposizione, analoga a quella dei riduttori di potenziale, rappresentata dalla fig. 8, nella quale G rappresenta l'elettrocalamita generatrice delle correnti indotte, C il condensatore, T il telefono ed AB un reostato a corsoio. Indicando con R la resistenza e con I l'intensità della corrente nel ramo principale AGB, con  $\rho$  e con  $i$  quelle nel ramo derivato ATS del telefono, e con  $r$  ed  $r'$  le resistenze delle due parti del reostato a destra e a sinistra del corsoio S, per l'intensità  $i$  della corrente nel circuito del telefono, mediante le leggi di Kirchhoff, che valgono anche per le correnti alternate la cui frequenza sia quella che corrisponde alla risonanza elettrica, si trova, come per le correnti continue:

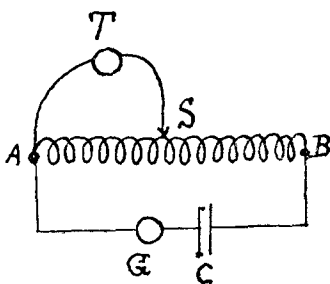


Fig. 8.

$$(15) \quad i = \frac{\varepsilon r'}{(R + r)(\rho + r') + \rho r'}$$

ove con  $\varepsilon$  si è indicata la f. e. m. indotta nell'elettromagnete.

La (15) può anche scriversi sotto la forma

$$(16) \quad i = \frac{\varepsilon r'}{R \left\{ \left( 1 + \frac{r}{R} \right) (\rho + r') + \frac{\rho r'}{R} \right\}} .$$

Se la resistenza  $R$  è molto grande in confronto a quelle di tutte le altre porzioni del circuito, la (16), trascurando  $\frac{r}{R}$  e  $\frac{\rho r'}{R}$ , si riduce a

$$(17) \quad i = \frac{\varepsilon}{R} \frac{r'}{\rho + r'} .$$

Questa equazione coincide con quella che si otterrebbe supponendo costante la differenza di potenziale fra i punti A e B, indipendentemente dalla posizione del corsoio S.

L'intensità della corrente che circola nel telefono, e quindi anche l'intensità del suono, sarà proporzionale al quoziente  $\frac{r'}{\rho + r'}$ .

Per adoperare l'alternatore come acumetro si dovrà dunque determinare, da prima, per ciascuna nota, o la resistenza  $r'$  del reostato che occorre per ottenere al telefono l'intensità corrispondente alla soglia fisiologica normale per una data distanza fra il nucleo dell'elettrocalamita e il pendolo, ovvero la distanza fra nucleo e pendolo perchè per una data resistenza  $r'$  si abbia l'intensità corrispondente alla soglia.

Sia  $r_0$  questa resistenza iniziale; allora la resistenza  $r_n$  della derivazione AS che occorre per ottenere un'intensità  $n$  volte maggiore della soglia sarà data dalla relazione

$$\frac{r_n}{\rho + r_n} = n \frac{r_0}{\rho + r_0}$$

dalla quale si ha

$$(18) \quad r_n = \frac{n \rho r_0}{\rho + (n - 1) r_0} .$$

È facile quindi determinare la serie delle resistenze  $r_n$  che si debbono adoprare per ottenere una successione determinata nelle intensità del suono.

Se invece si scelgono arbitrariamente le resistenze della derivazione AS, il valore di  $n$  (cioè quello dell'intensità del suono in rapporto con la soglia fisiologica) sarà dato da

$$(19) \quad n = \frac{\rho + r_0}{r_0} \frac{r_n}{\rho + r_n}.$$

Finchè  $r_n$  si mantiene molto piccolo di fronte alla resistenza  $\rho$  del telefono, i valori di  $n$  sono quindi molto sensibilmente proporzionale ad  $r_n$ .

Può darsi che la resistenza iniziale  $r_0$  che era necessaria per avere la soglia fisiologica in un dato momento, debba cambiarsi, in una serie successiva di misure; e ciò o a motivo delle mutate condizioni di ambiente o di acuità uditiva nello sperimentatore (sia per ragioni fisiologiche, sia per la diversa regione della scala tonale nella quale si fanno le misure) o anche per una variazione avvenuta nell'intraferro.

Sia allora  $kr_0$  il nuovo valore della resistenza corrispondente alla nuova soglia dell'eccitazione. Indicando con  $n_k$  il multiplo della soglia che corrisponde ora alla resistenza  $r_n$ , è facile vedere, mediante la (19) che sarà

$$n_k = \frac{\rho + kr_0}{kr_0} \frac{r_n}{\rho + r_n}$$

e dividendo questa per la (19) otterremo

$$(20) \quad n_k = n \frac{r_0}{kr_0} \frac{\rho + kr_0}{\rho + r_0} = \frac{n}{k} \frac{1 + \frac{kr_0}{\rho}}{1 + \frac{r_0}{\rho}}.$$

E poichè la resistenza  $r_0$  è generalmente trascurabile di fronte a  $\rho$ , trascurando le frazioni  $\frac{kr_0}{\rho}$  e  $\frac{r_0}{\rho}$  si potrà assumere

$$n_k = \frac{n}{k}.$$

Cioè: la serie dei multipli che erano stati determinati per la resistenza  $r_0$  verrà semplicemente divisa per  $k$ .

Questa osservazione facilita notevolmente l'uso dell'apparecchio per note diverse e per persone diverse.

Per ottenere facilmente i primi multipli 1, 2, 3, ... fino a 100 (ed eventualmente le loro frazioni) è opportuno formare il reostato AB della fig. 8 di due porzioni: una costituita da un filo sottile di alta resistenza specifica (ad es. nichelina di  $\frac{2}{10}$  di mm.) avvolto nudo su un cilindro di legno, sulle cui spire si appoggia una molla rappresentante il corsoio S, e l'altra costituita da una serie di resistenze calcolate pei valori di  $n$  da 100 in poi, e che si possono inserire con una disposizione indicata dalla fig. 9. Si dovrà allora rego-

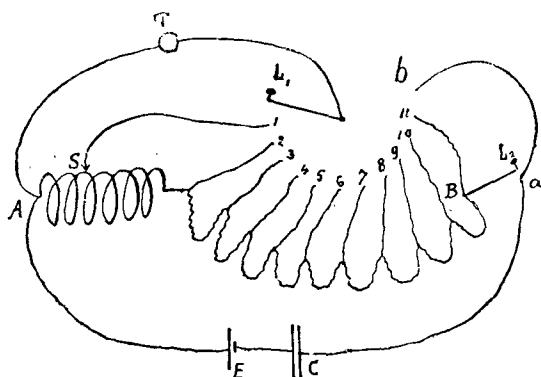


Fig. 9.

lare l'intraferro perchè la soglia fisiologica normale corrisponda alla resistenza  $r_0 = \frac{1}{100}$  di quella del filo che è avvolto sul cilindro, e le resistenze che si includeranno con le leve potranno corrispondere ai valori 125, 150, 250, 300 .... 1000 di  $n$  o a quella serie di multipli che più si desidera. I multipli  $n$  inferiori a 100 saranno dati da determinati numeri di spire (o frazioni di spire) del filo avvolto sul cilindro.

Poichè la f. e. m. indotta nell'elettromagnete cambia con la velocità del pendolo, la resistenza che corrisponde alla soglia fisiologica dell'eccitazione varia al variare della nota che

si sceglie nell'esame acumetrico. Per ciascuna di queste note si dovrà dunque determinare la resistenza  $r_0$ , e l'intensità del suono che si avrà al telefono quando si adoperano le altre resistenze della fig. 9 si dovrà calcolare in base a quanto si è osservato sopra.

Quando deve funzionare il cilindro, la leva  $L_1$  della fig. 9 deve posare sul contatto 1 e la leva  $L_2$  sul contatto  $a$ . Allorchè la leva  $L_1$  è sul contatto  $b$ , se si interrompe il contatto fra la leva  $L_2$  e il punto  $a$ , pel telefono passa tutta la corrente fornita dall'elettromagnete.

Se il campo magnetico dell'alternatore è tale da fornire correnti indotte abbastanza intense, nelle ricerche acumetriche si può graduare l'intensità del suono con lo stesso metodo che adottai in altri miei acumetri <sup>1)</sup>. La corrente fornita dal movimento del pendolo si fa, cioè, passare in un solenoide neutro, sul quale è avvolta una serie di spirali formate da 1, 2, 2, 5 . . . . 500, 1000 spire, e con una disposizione assai semplice di contatti si possono includere nel circuito del telefono da 1 a 2000 spire.

Con questo metodo si regola l'intraferro in modo che la soglia dell'eccitazione per l'orecchio normale corrisponda all'inserzione di 1 sola spira indotta nel circuito del telefono.

Ma è da osservare che l'intensità delle correnti ottenute con l'alternatore varia notevolmente col loro periodo, perchè la f. e. m. indotta è proporzionale alla velocità con la quale varia il flusso magnetico, e questa velocità è tanto maggiore quanto più grande è l'altezza da cui cade il pendolo. Per questo motivo accade che se per un dato intraferro basta una spira indotta per eccitare la sensazione sonora quando il pendolo cade, per es. da un angolo di  $75^\circ$ , occorre un numero sempre crescente di spire per cadute da altezze via via minori. Poichè non si può ogni volta cambiare l'intraferro (senza notevole perdita di tempo), ciò renderebbe praticamente inapplicabile il metodo del solenoide neutro per le note basse.

<sup>1)</sup> *Atti R. Acc. dei Lincei*, XIV, 1905; *Nuovo Cimento*, 10, p. 65, 1905.

Infatti mentre per le note acute — con un dato intraferro — bastando 1 spira sola per la soglia, l'intensità del suono si può comodamente far variare nel rapporto da 1 a 2000, per le note gravi, per le quali onde ottenere la soglia col medesimo intraferro possono occorrere anche 200 spire, l'intensità del suono potrebbe variare solo da 1 a 10.

Convieni dunque fare in modo che, senza variare l'intraferro, la soglia dell'eccitazione sia ottenuta per qualunque nota con 1 sola spira indotta. E ciò può raggiungersi usando non più un solenoide neutro senza ferro, ma un solenoide cilindrico entro il quale possa introdursi un nucleo di ferro dolce.

L'esattezza sarà, così, minore che col solenoide neutro; ma le misure riusciranno con un'approssimazione più che sufficiente per la pratica, scegliendo un solenoide assai lungo e disponendo tutta la serie delle spire indotte in un piccolo spazio al centro del solenoide.

Sarà utile adoperare un nucleo di ferro conico portato da un'opportuna slitta, e su di essa potranno segnarsi le posizioni che corrispondono alla soglia per ciascuna delle note che si sono scelte.

Riguardo alle applicazioni che l'alternatore può trovare nella fisiologia e nella fonetica, mi limiterò qui a pochi cenni su alcuni fatti che ho avuto modo di costatare.

Se la capacità del circuito è via via quella adatta, per ogni frequenza si ha al telefono un suono assai puro, musicale, che, per piccole frequenze, assume ben distintamente il carattere della vocale *u*. Ma se si altera la capacità, facendola minore di quella necessaria alla risonanza, insieme alla corrente del periodo fondamentale se ne hanno altre di periodi multipli (armoniche) e il suono, che diviene molto complesso, assume talvolta il carattere della vocale *a*, tal'altra della *o*, che sieno pronunziate con voce rauca.

Se l'arco fissato al pendolo è formato da una serie di lamine distribuite uniformemente due a due, come ad es.  
 || || || . . . . per piccole frequenze e per capacità ottima



si ha un suono assai puro, che somiglia alla  $u$ ; per capacità minori e per note più acute il suono è somigliante alla  $o$ .

Con una serie disposta diversamente, ad es.  $\parallel \mid \parallel \mid$  . . . . . si ha un suono che, se la capacità del circuito è minore di quella necessaria, ha un carattere fra la  $a$  e la  $e$ ; per piccole frequenze e capacità ottima anche con questa serie di lamine si ha un suono cupo somigliante alla  $u$ . È notevole il fatto che il carattere del suono non dipende, con questa distribuzione delle lamine di ferro, dal senso del movimento del pendolo. Quindi il suono che si ha al telefono non dipende dall'ordine in cui si succedono le correnti alternate nè dalle loro fasi.

Usando una sola lamina di ferro al telefono si ode, ad ogni oscillazione del pendolo, un rumore che è più o meno intenso a seconda della velocità con la quale la lamina passa di fronte all'elettrocalamita; ma il carattere di quel rumore, determinato dalla vibrazione propria della lamina telefonica, resta invariato qualunque sia l'altezza da cui cade il pendolo. Soltanto, per piccole frequenze e per una capacità del circuito molto grande, quel suono si fa più cupo, probabilmente per la soppressione delle armoniche di ordine elevato.

Con due sole lamine vicine si percepisce un rumore la cui tonalità cresce manifestamente al crescere della velocità con la quale esse passano di fronte all'elettrocalamita. Se le due lamine sono un poco distanti, per piccole velocità si distinguono separati i rumori dovuti al passaggio di ciascuna; ma per velocità superiori a un dato valore (dipendente dalla distanza fra le lamine e probabilmente dall'orecchio che ascolta) quei rumori si fondono e si comincia a percepire una certa tonalità, che cresce con la velocità.

---