

COPY CLAF

FOR

CASE FILE

UNIVERSITA' DI GENOVA
Istituto di Meccanica Applicata alle Macchine
Rapporto IIR.70.AL.147

(NASA-CR-127250) CRITERIA FOR THE CHOICE
OF A CAPACITIVE DEVICE FOR MECHANICAL
MEASUREMENTS A.L. Lucifredi (Genoa Univ.)
Nov. 1970 20 p CSCL 14B

N72-27434

Unclas

G3/14 90000

CRITERI DI SCELTA DI UN'APPARECCHIATURA CAPACITIVA PER MISURE
MECCANICHE

Submitted to "Automazione e Strumentazione"



FRES

Dr. Ing. Aleramo LUCIFREDI

Novembre, 1970

ESRO fellow

CRITERI DI SCELTA DI UN'APPARECCHIATURA CAPACITIVA PER MISURE MECCANICHE

SOMMARIO

Il presente articolo vuole costituire un contributo originale al fine di fornire all'ingegnere che si occupi di strumentazione per misure meccaniche precisi criteri di orientamento nella scelta di unità capacitive; speciale risalto viene dato alla valutazione dei pro e dei contro sia dei differenti modelli di trasduttori capacitivi, sia dei diversi circuiti di rivelazione. Vengono presi inoltre in esame altri elementi che sono oggetto di scelta e vengono suggerite insolite applicazioni meccaniche. Un esempio di calcolo di progetto chiarisce l'esposizione.

INTRODUZIONE

In un altro articolo rif. 5 l'autore ha analizzato e discusso la teoria, le forme costruttive, i circuiti, utilizzati per i trasduttori capacitivi. Sono stati analizzati in dettaglio anche i vantaggi e gli svantaggi di una trasduzione capacitiva, i principali dei quali sono schematicamente riportati nella tabella di figura 1. Qualora, da una valutazione dei pro e dei contro, il progettista abbia deciso per una soluzione di tipo capacitivo, nasce subito per lui il problema dell'ulteriore scelta fra l'acquisto in commercio di un'apparecchiatura già costruita e la costruzione di un'apparecchiatura ad hoc, sia che la realizzi con i suoi mezzi, sia che la commissioni ad altri. Occorre scegliere il modello di trasduttore capacitivo ed il tipo di circuito di rivelazione.

SCELTA DEL METODO DI TRASDUTTORE CAPACITIVO

Senza pretendere di voler risolvere in modo completo ed univoco questo problema, fra il resto perchè è fortemente variabile da un'applicazione particolare ad un'altra, ci limiteremo a qualche osservazione. Innanzitutto sarà in genere da preferir

NOTA. Quest'articolo fa parte di una ricerca svolta dall'autore presso l'Università di Stanford, California, nell'ambito di una borsa di studio ESRO-NASA.

si un'unità differenziale rispetto ad un'unità singola, non solo perchè fornisce un segnale più forte (doppio con i circuiti più usati), ma anche perchè offre una più elevata stabilità ed una linearità su un più ampio campo di spostamenti. L'unità, qualunque essa sia, dovrà essere schermata e la schermatura verrà messa a terra.

Nel caso in cui il trasduttore venga realizzato in proprio, occorrerà tenere presenti le limitazioni nel minimizzare la distanza fra gli elettrodi; infatti, se è vero che una piccola distanza massimizza la capacità attiva, è vero anche che massimizza la probabilità che le armature nel loro moto reciproco si urtino, a prescindere poi dalla possibilità di scariche elettriche; al riguardo si ricorda però che per un condensatore ad aria con applicati 10 [V] la minima distanza di separazione deve essere $3 \cdot 10^{-3}$ [mm] circa; sarà comunque opportuno, se si vogliono realizzare sensibilità eccezionali, arrotondare gli spigoli. Si ricorda che, per la $C = \frac{K S}{d}$, (dove C è la capacità, K è una costante che dipende dal dielettrico e dalle unità di misura, S è la superficie affacciata delle armature, d la distanza fra le armature), la sensibilità è

$$\frac{d C}{d d} = - \frac{K S}{d^2}$$

cioè la sensibilità è particolarmente grande per piccole distanze di separazione fra gli elettrodi. Sempre soprattutto nel caso di apparecchiature con prestazioni piuttosto spinte, bisognerà evitare ogni irregolarità superficiale delle armature, lisciandole fino a renderle piane otticamente, affinché esse vengano a costituire un limite per la sensibilità.

Un'altra considerazione di carattere elettrico riguarda le modalità di connessione dei terminali del trasduttore; non è infatti del tutto indifferente connettere il conduttore a po-

tenziale più alto all'una o all'altra armatura e ciò avviene per ragioni sia meccaniche, sia elettriche. Innanzitutto se il conduttore non al potenziale di terra viene connesso all'organo mobile, sarà necessario isolare quest'ultimo dal suo collegamento meccanico e sarà perciò necessario portare all'organo mobile la tensione tramite un filo flessibile o un contatto strisciante. Pertanto fra le 4 possibili soluzioni rappresentate in figura 2, la 1) e la 2) sono già da scartare (si sono chiamate V e T gli elettrodi a più alto potenziale e a terra rispettivamente e I l'isolante). La soluzione 4) è la migliore ed è superiore alla 3) perchè semplifica, come mostra la figura, la realizzazione meccanica per un corretto scorrimento dell'organo mobile ed anche perchè in tal modo la capacità fra la schermatura e l'elettrodo a più elevato potenziale rimane costante durante il movimento. Non va infatti dimenticato che la ragione d'essere della schermatura consiste nel fatto che spostamenti di oggetti conduttori o isolanti in vicinanza degli elettrodi tenderebbero altrimenti a generare variazioni della capacità fra ciascun elettrodo e la terra, dando luogo così a rumori spuri.

Nel caso in cui il trasduttore serva per una misura di livello, bisognerà distinguere fra i mezzi che sono conduttori e quelli che non lo sono: nel caso di un liquido conduttore, un elettrodo dovrà essere infatti isolato da un rivestimento, ad esempio di teflon. Si ricordi inoltre che per ogni liquido usato bisognerà predisporre una diversa curva di taratura.

Un'altra scelta potrà essere quella fra un trasduttore capacitivo di tipo convenzionale ed una semplice sonda capacitiva: quest'ultima non ha contatti elettrici con il corpo in moto o che in generale si vuole sapere se è presente o meno; il movimento del corpo, sia esso dielettrico o conduttore, fa variare la capacità rispetto a terra [figura 3 (caso di corpo dielettrico)]. E' questo un metodo semplice, che ha moltissimi

me applicazioni nel campo meccanico; è meno sensibile dei metodi più comuni, però si presta a misure di frequenza e di ampiezza di spostamenti, al conteggio di pezzi, a controlli di tipo va - non va, etc.

Fin qui abbiamo sottolineato prevalentemente gli aspetti elettrici della scelta del trasduttore. Dal punto di vista meccanico, si possono fare alcuni rilievi. Innanzitutto, se ad esempio il dispositivo è un trasduttore di pressione ed è montato su un corpo soggetto a forti accelerazioni, sarà bene montare il piano del diaframma parallelo alla direzione del moto, per minimizzare gli effetti delle accelerazioni stesse. Se la temperatura è molto elevata oppure è fortemente variabile, sarà bene acquistare i modelli che prevedono una camicia entro cui fare circolare un liquido, ad esempio acqua (vedasi la figura 4). Sarà necessario ricordare anche che l'umidità e la pressione influenzano la permittività del dielettrico, introducendo cambiamenti del segnale d'uscita. Quanto ai materiali, per tutte le parti non metalliche vanno usati materiali inorganici, per garantirsi da possibili alterazioni.

SCELTA DEI CIRCUITI

Mentre si rimanda al già citato articolo dell'autore [rif.5] ed ai riferimenti [1] , [2] , [3] , [4] , [6] , [11] , per una descrizione della vasta gamma di circuiti possibili e per le equazioni dettagliate del funzionamento, ci si propone qui di fare un confronto fra alcuni dei migliori circuiti e di stabilire inoltre criteri di scelta, estendendoli anche ad altre grandezze (ad esempio la frequenza di alimentazione) che non possono assolutamente essere fissate senza cognizione di causa. I tre circuiti che vogliamo mettere a confronto sono rappresentati nella figura 5; la discussione di un quarto circuito, adatto per telemetria, sarà fatta a parte. Nella figura 5, in a) è rappresentato un ponte convenzionale, in b) un ponte a diodi, detto a

doppio T. Quest'ultimo può essere ridisegnato come in figura 6 per mostrare, per confronto con la 5 a), le analogie e le differenze dello schema rispetto a quello del ponte tradizionale. Quest'ultimo è senz'altro il circuito più noto il che costituisce un vantaggio; la risposta, per piccole variazioni di capacità, è lineare, il verso dello spostamento è riconoscibile dalla fase. Tuttavia nel caso di trasduttori capacitivi sono sensibili due svantaggi. Innanzitutto possono aver si problemi di messa a terra e schermatura, in conseguenza del fatto che non si possono collegare a terra entrambi i circuiti d'ingresso e d'uscita, ma solo uno di essi; tali difficoltà sono superabili in vario modo, ma a prezzo di complicazioni. L'altro inconveniente si palesa solo nel caso, peraltro assai frequente in registrazioni o telemetria, in cui si abbia necessità di un segnale in corrente continua: essendo il segnale d'uscita del ponte a basso livello, i diodi necessari per il raddrizzamento lavorano nella zona più sfavorevole della loro curva caratteristica; influiscono anche variazioni termiche delle caratteristiche dei diodi stessi.

Il ponte a diodi a doppio T è senz'altro, pur nella sua semplicità, un circuito più raffinato del ponte tradizionale. L'ingresso, l'uscita ed un'armatura di ciascuno dei due condensatori sono messi a terra. Il segnale d'uscita è in corrente continua, come spesso è desiderato. In generale, inoltre, i diodi operano su tensioni sufficientemente alte e cioè in zone lineari della loro curva caratteristica. L'impedenza d'uscita può essere tenuta sufficientemente bassa, di modo che il segnale può essere misurato direttamente con un milli o microamperometro o con un registratore. La tensione del segnale che si rileva in uscita è elevata. Per un'alimentazione sinusoidale a 45[V] efficaci di frequenza 1,3 [MHz] ed una variazione di capacità di ± 7 [pF], il Lion ha ottenuto una corrente d'uscita di

$\pm 250 [\mu A]$ in un carico da $1 [k\Omega]$ ed una tensione di $\pm 5 [V]$ in un carico da $1 [M\Omega]$, questo, si noti, mantenendo minore dell'1% lo scarto di linearità; i segnali altrimenti possono essere molto più forti. Scegliendo i parametri in modo da operare nella parte piatta della curva della sensibilità (cioè nella zona del massimo), eventuali variazioni di frequenza non influiscono quasi; basta perciò un'alimentazione stabilizzata solo in ampiezza, non in frequenza, e perciò assai meno costosa. Per queste ed altre peculiarità il ponte a diodi a doppio T è da ritenersi forse il più soddisfacente circuito per uso generale.

Lo schema della figura 5 c) rappresenta un'altra ottima soluzione, che offre un campo di linearità molto vasto, come del resto il circuito precedente; rispetto a questo, che scrive ritiene che in alcuni casi essa possa essere ritenuta superiore. Quando infatti per particolari ragioni costruttive le capacità siano molto piccole, adottando il circuito a diodi a doppio T, la capacità dei diodi, dell'ordine di $1 [pF]$, non è più trascurabile, anzi può divenire preponderante. Se poi, in speciali applicazioni di tipo scientifico, la forza fra le armature, già assai piccola, deve essere ulteriormente minimizzata, ciò comporta tensioni molto basse applicate alle armature, ad esempio $0,25 [V]$; ora è chiaro che la variazione termica della caduta di tensione nei diodi diventa una forte causa di errore. Indipendentemente poi dalle variazioni di temperatura, va notato inoltre che i due diodi non avranno mai caratteristiche perfettamente uguali. Per questi motivi, si ritiene che il circuito della figura 5 c) sia talora preferibile al ponte a diodi.

Per applicazioni di telemetria vengono molto spesso usati circuiti a modulazione di frequenza (anche se, per applicazioni molto raffinate, talora si preferiscono segnali che si

presentino non sotto forma di variazione di frequenza ma sotto forma di corrente continua a livello elevato, ad es. 5 [V]); un oscillatore viene modulato in frequenza dal trasduttore capacitivo ed irradia un segnale, che viene raccolto da un'antenna e, tramite un preamplificatore, inviato a un ricevitore a modulazione di frequenza; il segnale, demodulato, pilota un oscillografo registratore o, se si desidera, un convertitore analogico-digitale di dati ed un registratore digitale di dati. Particolare interesse riveste il tipo di oscillatore usato. La figura 7 riporta due circuiti che sono stati impiegati con ottimi risultati; il primo è un oscillatore di Hartley mo dificato, il secondo un oscillatore di Colpitts. Il primo uti lizza una retroazione induttiva, il secondo una retroazione ca pacitiva; il termistore serve per la compensazione di temperatura. Il secondo schema è preferibile al primo perchè la frequenza centrale di oscillazione è molto più stabile al variare della temperatura. Inoltre l'assorbimento di corrente è mi nore; va infatti sottolineato che l'estremo interesse di questa realizzazione sta nella miniaturizzazione raggiungibile: riportiamo al riguardo la figura 8, relativa ad un trasduttore di pressione realizzato presso l'Ames Research Center della NASA, Moffett Field, California. Si notino i seguenti dati numerici, in particolare i primi due: diametro del trasduttore 6,35 [mm], distanza fra le armature $2 \cdot 10^{-2}$ [mm]; spessore del diaframma 0,127 [mm], campo di pressioni $\pm 6,8 \cdot 10^{-3}$ [atm], corrispondente campo di variazione della frequenza $\pm 0,8$ [MHz], fre quenza centrale 117 [MHz].

Fra qui i circuiti. Consideriamo ora la scelta della fre quenza dell'eccitazione. Possono usarsi audiofrequenze o radiofrequenze. L'uso di radiofrequenze offre alte sensibilità, con circuiti relativamente semplici, nei casi in cui la sorgente di alimentazione, sia il circuito demodulatore, siano nelle im

mediate adiacenze del trasduttore o quando si faccia uso di ca
vi per radiofrequenza. L'uso di audiofrequenze sarà invece pre
feribile quando il collegamento fra il trasduttore e l'elemen
to a valle non possa non avere una certa lunghezza o quando ci
si trovi in presenza di accoppiamenti parassiti fra i circuiti;
con frequenze $1 + 10$ [kHz] la sensibilità in termini di sposta-
mento delle armature è per solito dell'ordine di $2 \cdot 10^{-2} + 3 \cdot 10^{-2}$
[mm]. Quando possibile si usano comunque frequenze elevate; va
infatti ricordato che la risposta in frequenza del trasduttore
può essere limitata da una troppo bassa frequenza dell'oscilla
tore che lo alimenta; molto usate sono frequenze intorno a 1
[MHz]; con esse, una frequenza di variazione di $50 + 100$ [kHz] per
la capacità è senz'altro detettabile.

Usando un circuito di rivelazione a diodi a doppio T, co
me si è detto, non è necessario che questa frequenza risulti
stabilizzata; dovrà essere però stabilizzata l'ampiezza.

Le forme d'onda usate sono: onde quadre e onde sinusoida
li.

ALTRI CRITERI DI SCELTA

Una caratteristica molto interessante dei trasduttori ca
pacitivi è quella che una delle armature può essere costituita
dall'oggetto stesso sotto misura. Il movimento è rilevabile an
che nel caso di corpi non conduttori, però con minore sensibi-
lità; in tal caso il progettista meccanico dovrà valutare se
eventualmente non sia conveniente una verniciatura totale o par
ziale (ad esempio a righe o a griglia) dei pezzi con vernice
conduttrice, per accrescere la sensibilità dell'apparato capa-
citivo di controllo.

Nel caso in cui si usino unità differenziali, sarà di va
lutarsi quanto sia da temere, in quella specifica applicazione
per cui si sta facendo il progetto, una tensione di offset in

corrispondenza della posizione centrata, ricordando che c'è una forte dipendenza fra la distanza tra le armature e tale tensione, quest'ultima diminuendo con la distanza fra esse.

ESEMPIO DI CALCOLO

Si voglia calcolare un trasduttore di pressione differenziale il cui campo di misura sia $\pm p_{\max}$. Supponiamo di avere a disposizione un generatore di onde quadre a tensione E_i e frequenza f ed uno strumento di misura con resistenza d'ingresso R_u e di volere inoltre che il segnale d'uscita vari nell'intervallo $\pm E_{u\max}$. Si scelga di adottare un'unità capacitiva di tipo differenziale ed un ponte a diodi a doppio T. Si calcola innanzitutto la variazione di capacità necessaria. Per la legge che governa tale ponte, scritta nella forma

$$C_1 - C_2 = \frac{E_u (R + R_u)^2}{E_i f R R_u (R + 2R_u)} \quad (1)$$

dove $R_1 = R_2 = R$ (vedasi fig. 5b), fissato R si ricava $C_1 - C_2$, cioè la variazione di capacità necessaria per produrre il voluto segnale d'uscita. Ordini di grandezza delle variabili fin qui esaminate potrebbero essere: $E_i = 50 [V]$, $f = 1,3 [MHz]$, $R_u = 1 [M\Omega]$, $E_{u\max} = \pm 5 [V]$, $R = 100 [k\Omega]$, $C_1 - C_2 = 5 [pF]$.

Quando la membrana è in posizione centrata $C_1 = C_2$. Se essa sotto l'effetto di $p_{\max}$ si sposta di $\delta_{\max}$ si ha:

$$C_1 = K \frac{S}{d - \delta_{\max}} \quad C_2 = K \frac{S}{d + \delta_{\max}}$$

da cui

$$C_1 - C_2 = K S \frac{2 \delta_{\max}}{d^2 - \delta_{\max}^2} \quad (2)$$

Si fissa S e così nella (2) rimangono solo due incognite, cioè $\delta_{\max}$ e d . Si fissa lo spessore della membrana in base a considerazione di resistenza meccanica di una lastra sotto l'effetto

di una forza distribuita.

Per far ciò si ricorda che lo sforzo nella membrana è massimo lungo la circonferenza e vale

$$\delta_{\max} = \frac{3 D^2}{16 h^2} P_{\max} \quad (3)$$

essendo D il diametro della membrana ed h il suo spessore.

L'inflessione δ di un diaframma incastrato lungo la circonferenza vale

$$\delta_0 = \frac{3}{16} P_{\max} \frac{1 - k^2}{E h^3} R_{\max}^4 \quad (4)$$

in corrispondenza del punto centrale, e vale

$$\delta = \frac{3}{16} P_{\max} \frac{1 - k^2}{E h^3} R_{\max}^4 \left[1 - \left(\frac{r}{R_{\max}} \right)^2 \right]^2 \quad (5)$$

in corrispondenza del generico raggio r . Si sono detti E il modulo di Young, k il rapporto di Poisson (0,3 per l'acciaio) ed $R_{\max}$ il raggio all'incastro della membrana.

Si assume come $\delta_{\max}$ un valore medio e si ottiene così d dalla (2). Si fa ora un controllo sulla nonlinearità: basterà con la (2) ricavare il grafico $(C_1 - C_2, \delta)$ e verificare lo scarto in corrispondenza di $\delta_{\max}$. Le capacità $C_1 = C_2$ fra la membrana e gli altri due elettrodi in posizione centrata, sono date dalla

$$C_1 = C_2 = K \frac{S}{d}$$

SUGGERIMENTI PER INSOLITE APPLICAZIONI MECCANICHE

Un interessante campo di utilizzazione dei trasduttori capacitivi riguarda le prove non distruttive di laminati plastici rinforzati con fibre di vetro; uno studio al riguardo è stato condotto da S. Smith (vedasi riferimento 9), che ha sviluppato delle tecniche per determinare lo spessore e la percentuale di fibra di vetro presente. Sebbene questo metodo abbia anch'esso delle limitazioni, esso pare uno dei più sensibili e precisi, in confronto ai procedimenti radiografici, a ultrasuoni, termici, etc.

Non entreremo ovviamente nei dettagli, tuttavia sarà utile qualche cenno. L'apparecchiatura di prova si presenta come in figura 9. Poichè un condensatore piano con due dielettrici può essere pensato come due capacità in serie, si ha (vedasi figura 10), ricordando che l'aria ha costante dielettrica unitaria, la formula

$$C = \frac{k'}{(d-t) + t/\epsilon_c}$$

dove k' dipende dalla superficie delle armature e dalle unità di misura ed ϵ_c è la costante dielettrica del materiale in prova.

Si misurano le capacità quando la sonda poggia sul provino, quando la sonda è sollevata fino ad urtare l'arresto, quando la sonda è estratta dal suo alloggiamento e portata lontana (in teoria all' ∞). Chiamando $\Delta C'_o$ e $\Delta C'_d$ le variazioni di capacità fra quella all'infinito e quelle, rispettivamente, nelle due posizioni definite in precedenza, si ricava immediatamente la

$$t = d - \left(\frac{1}{\Delta C'_d} - \frac{1}{\Delta C'_o} \right)$$

che è l'espressione dello spessore. Si osservi che d è nota.

Con qualche assunzione si ricava che il peso P di resina per unità di area è dato dalla

$$P = \frac{\Delta C'_o t^2}{K_1} - K_2$$

dove K_1 e K_2 sono delle costanti.

Come circuito di rivelazione viene usato un ponte a diodi a doppio T.

Un altro interessante esempio di applicazione un po' speciale, è costituito dal detettore di spostamento in corso di realizzazione per il satellite artificiale Triad I, che serve

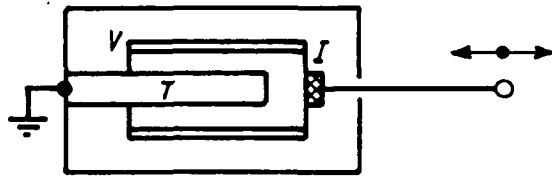
per esperimenti connessi con l'uso dei satelliti come riferimenti per la navigazione. Viene messo in orbita un satellite contenente una massa di prova sferica; si vuole isolare quest'ultima da qualunque azione proveniente dall'esterno ed anche dal contatto con il satellite stesso, in modo che sulla massa di prova agisca solo la forza gravitazionale. Si realizza ciò comandando, con un detettore capacitivo tridirezionale, dei getti, che spostano il satellite rispetto alla massa di prova, in modo da forzare il satellite a seguirla senza toccarla. Si tratta di un'applicazione ideale per un trasduttore capacitivo, perchè mette a frutto la caratteristica di quest'ultimo di operare senza contatto ed inoltre senza esercitare una forza tangibile, cosa qui indispensabile. Quello che però è qui più interessante, perchè può trovare molteplici applicazioni più comuni, è come è realizzata la tridirezionalità delle capacità di detezione del sensore, che è un'unità differenziale composta. La massa di prova specifica costituisce l'armatura centrale dell'unità differenziale. Essa è disposta all'interno di un alloggiamento sferico cavo diviso in 6 parti fra loro isolate, che costituiscono le 3 paia ortogonali di armature fisse necessarie per la tridirezionalità della detezione.

Un sensore capacitivo tridirezionale sferico è stato adottato anche per un modernissimo tipo di accelerometro ad elevata sensibilità, di costruzione francese.

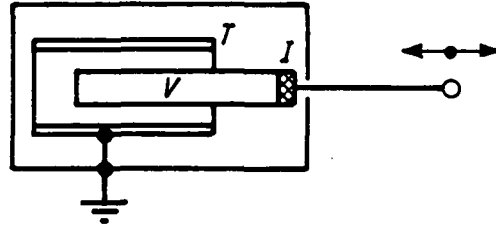
BIBLIOGRAFIA

- 1) T.G. BECYWITH, N.L.BUCK ; "Mechanical Measurements", Addison-Wesley Publishing Co., 1969.
- 2) E.O. DOEBELIN ; "Measurement Systems" Application and Design", Mc Graw-Hill Book Co., 1966.
- 3) T.L. FOLDVARI;K.S.LION; "Capacitive Transducers", da "Instruments & Control Systems", Novembre 1964.
- 4) K.S.LION ; "Nonlinear Twin-T Network for Capacitive Transducers", da "The Review of Scientific Instruments", Marzo 1964.
- 5) A.LUCIFREDI ; "I trasduttori capacitivi", Rapp. IIR.70.AL.146 Istituto di Meccanica Applicata - Università di Genova.
- 6) J.B. McDEVITT; D.R. HARRISON; W.K. LOCKMAN; "Measurement of Pressures and Heat Transfer by FM Telemetry", da "IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems", Vol. AES 2,N. 1, Gennaio 1966
- 7) C.F. O'DONNELL; "Inertial Navigation Analysis and Design", Mc Graw-Hill Book Co., 1964.
- 8) F.J. O'HIGGINS,"Basic Instrumentation - Industrial Measurement", Mc Graw-Hill Book Co., 1966.
- 9) S. SMITH;"A Capacitive Measurement System for the Nondestructive Testing of Fiberglass Reinforced Plastic Laminates", Stanford University, Dept of Aeronautics and Astronautics, SUDAAR 321, Luglio 1967.
- 10) E.T. THOMSON; "A Review of Electrical Techniques for Displacement Transducers", da "Instrumentation Technology", Gennaio 1968.
- 11) J.G.TRUXAL; "Control Engineers' Handbook", Mc Graw-Hill Book Co., 1958

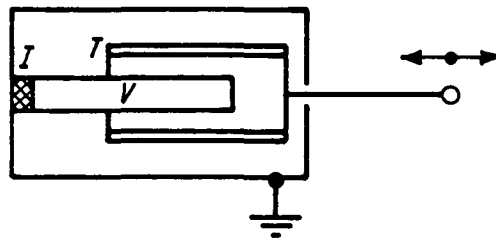
V A N T A G G I	S V A N T A G G I
- assenza di contatto meccanico e, talora, di connessione elettrica con l'organo mobile - richiesta di forza piccolissima - elemento mobile leggerissimo → ottima risposta dinamica - semplicità meccanica - robustezza - elevata sensibilità - forte segnale d'uscita - alto rapporto segnale/disturbo - facilità della schermatura elettrostatica - non influenza dei campi magnetici - scarsa dipendenza dalla temperatura	- elevata impedenza d'uscita → necessaria stretta vicinanza fra trasduttore e circuito di rivelazione - non linearità - influenza dell'umidità e della pressione
fig. 1 - Principali pregi e difetti dei trasduttori capacitivi	



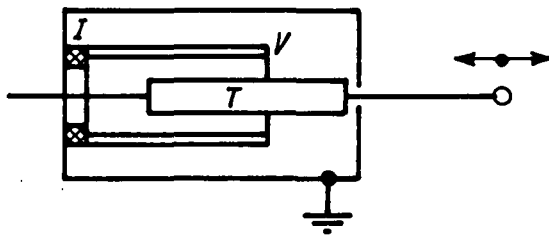
1



2



3



4

Fig.2

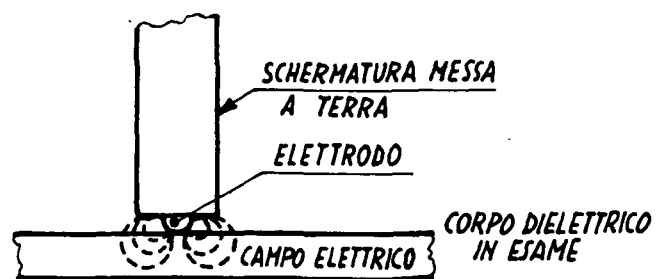


Fig. 3

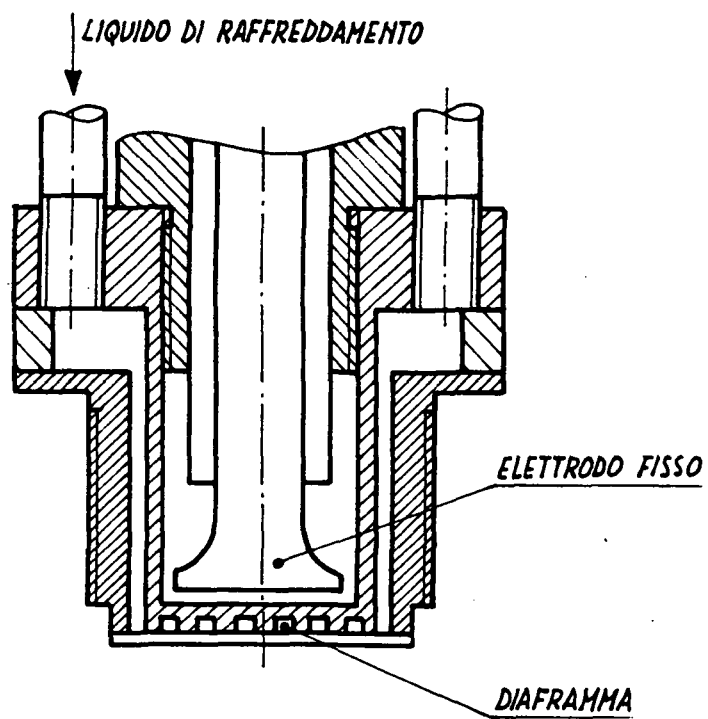
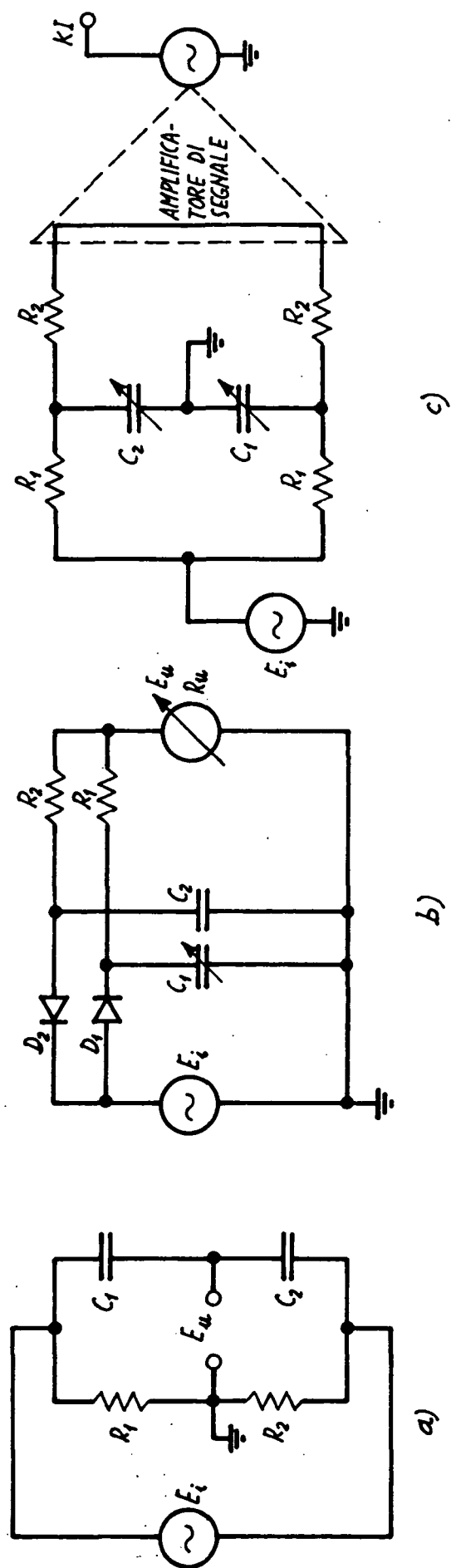


Fig. 4



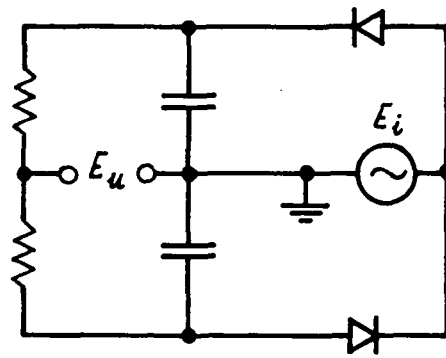


Fig. 6

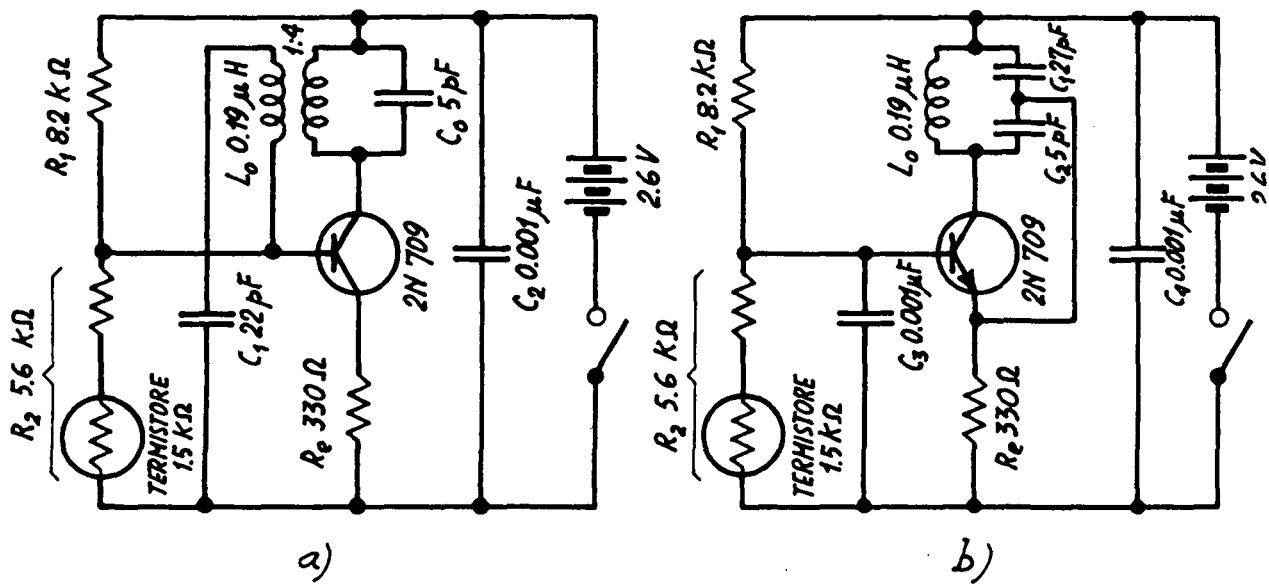


Fig. 7

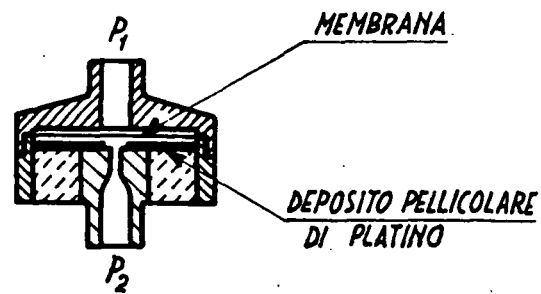


Fig. 8

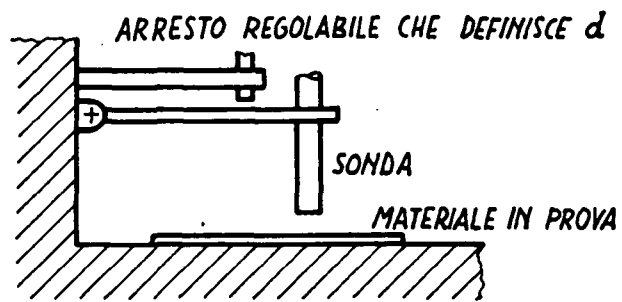


Fig. 9

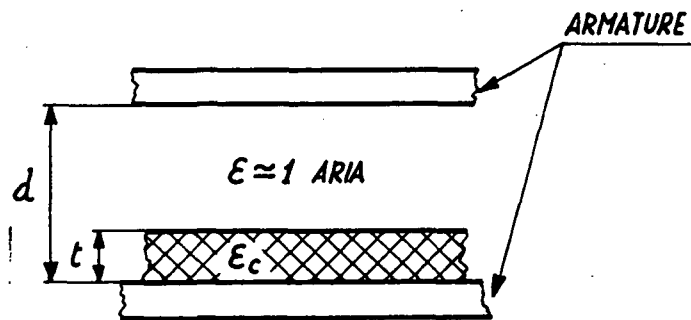


Fig. 10