



L.V.D.T.: chi era costui?

Federico Paoletti, IW5CJM

...ovvero: come misurare
semplicemente 1 millesimo di
micron e vivere felici e contenti.

Premessa

Sgombriamo subito il campo dalle ipotesi: L.V.D.T. è l'acronimo di "Linear Variable Differential Transformer", ovvero trasformatore differenziale variabile linearmente.

È un oggetto (che descriveremo meglio in seguito) in grado di misurare piccolissimi spostamenti, e che può quindi essere usato come calibro relativo di precisione, ma con alcune piccole modifiche anche come accelerometro, sismografo e molte altre cose.

Quando dico "piccolissimi" spostamenti intendo, con un'opportuna elettronica di contorno, qualcosa di molto vicino ad un millesimo di micron (dieci-alla-meno-nove-metri!) in una banda di 1 Hz. E scusate se è poco!

Parente dell'L.V.D.T. è il Rotary Variable Differential Transformer, ovvero un oggetto simile che invece di misurare spostamenti misura rotazioni angolari; sempre con la stessa elettronica è possibile anche impiegare ponti resistivi variabili di ogni tipo (da trasduttori lineari a celle di carico per bilance) con notevoli vantaggi in termini di rumore e sensibilità.

Nel seguito di questo articolo affronteremo, dopo un semplice trattato teorico, la costruzione casalinga di un sensore L.V.D.T. e della sua relativa elettronica; proporrò anche alcune applicazioni pratiche, dalle più semplici alle più complicate.

Andiamo ad iniziare!

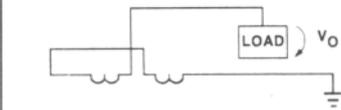
Teoria

Nella sua forma (commerciale) più comune un L.V.D.T. è costituito da tre avvolgimenti posti lungo lo stesso asse; quello al centro (il primario) viene eccitato da un segnale sinusoidale di frequenza opportuna; i due ai lati (il secondario), opportunamente connessi in controfase tra loro, sono quelli che "raccattano" l'informazione che ci serve. Poiché per avere l'informazione di spostamento bisogna "muovere" qualcosa, questo qualcosa è un nucleo di materiale magnetico a forma di cilindro che entra dentro le tre bobine.

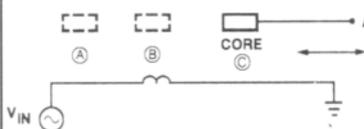
Quando il nucleo è posizionato al centro il segnale che viene mandato sul primario del trasformatore passa ai due secondari (per la nota teoria di funzionamento dei trasformatori). Solo che, essendo questi avvolti o connessi in controfase, non avremo alcun segnale in uscita.

Appena spostiamo il nucleo da una parte indurremo più segnale su una delle due bobine del secondario rispetto all'altra.

In uscita quindi si ottiene un segnale massimo se il nucleo è tutto da una parte, si riduce mano a mano che ci avviciniamo verso il centro, vale zero in questo punto, quindi ricomincia a salire (ma con fase opposta) fino a raggiungere di nuovo il mas-



Come varia l'uscita dell'L.V.D.T. in funzione della posizione del nucleo

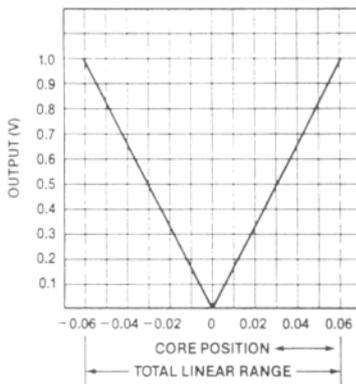
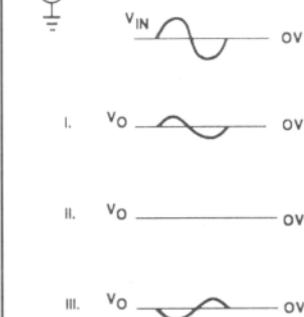


ACTUATOR (core):

1) Con il nucleo in A, l'uscita è in fase con l'ingresso, e decresce spostandolo verso B.

2) L'uscita alternata scende a zero per il nucleo in posizione B.

3) L'ampiezza dell'uscita incrementa muovendo il nucleo da B verso C con fase invertita di 180° rispetto l'ingresso.



Grandezza assoluta della tensione di uscita (sinistra) e rapporto fase/tensione d'uscita (sotto) in funzione della posizione del nucleo (core) in un L.V.D.T. (per gentile concessione della Schaevitz Engineering).

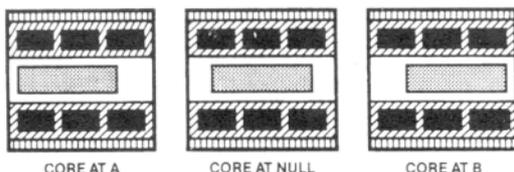
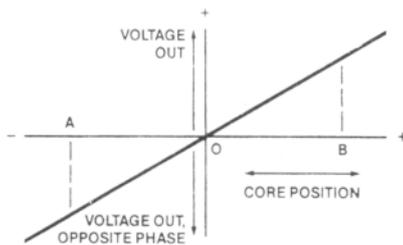


figura 1 - Ecco come è fatto e come funziona un L.V.D.T. commerciale.

simo arrivati all'estremo opposto. E siccome due immagini valgono più di cento parole, in figura 1 trovate descritto in forma grafica quanto espresso fino ad ora.

Ecco fatto, dirà qualcuno: abbiamo un segnale proporzionale allo spostamento, che altro ci serve?

Ci serve ben altro. Infatti dall'ampiezza del segnale in uscita abbiamo l'informazione di quanto il nucleo è dentro o fuori, ma niente sappiamo del verso, ovvero da che parte ci stiamo muovendo.

Per capirlo ci viene in aiuto la fase del segnale, che da un lato è uguale a quella del primario, nell'altro lato è sfasata di 180 gradi.

Abbiamo quindi bisogno di un elettronica che:

- generi un segnale sinusoidale di ampiezza rigorosamente costante;
- amplifichi con il rumore più basso possibile il segnale in uscita del trasduttore (non dimentichiamoci che nei dintorni della posizione centrale il segnale è prossimo a zero);
- dia in uscita una tensione continua di valore proporzionale allo spostamento, positiva se il nucleo è spostato da una parte, negativa nell'altro caso.

A questo punto è necessario parlare di rivelazione (o demodulazione) sincrona: questa è una tecnica che permette di "tenere conto" della fase durante il processo di elaborazione.

Immaginate, con uno sguardo alla figura 2, di connettere all'ingresso "demodulator input" il segnale che viene dal secondario dell'L.V.D.T.; contemporaneamente si applichi all'ingresso "sync" il segnale sinusoidale che eccita il primario; questo segnale, passando attraverso un comparatore, diventa un'onda quadra, con la quale è possibile comandare un interruttore-



re elettronico la cui funzione è di connettere l'uscita "demodulator output" alternativamente in fase e in controfase al segnale che proviene dal secondario.

Così facendo avremo in uscita una sinusoide rettificata, più o meno come accade in un ricevitore AM all'uscita del demodulatore.

Bene, se il nucleo dell' L.V.D.T è da una parte (e quindi ad esempio il segnale in uscita dal secondario è in fase con il segnale all'ingresso) avremo una sinusoide rettificata il cui valore medio è positivo; se è dall'altra parte i segnali del primario e del secondario sono in opposizione di fase, e la sinusoide rettificata in uscita avrà valore medio negativo.

Un semplice filtro passa basso, et voilà, abbiamo una tensione continua che ci dice da che parte e di quanto si è mosso il nucleo.

Pratica

Poiché un L.V.D.T. non è cosa che si trovi dietro ogni angolo, e per di più costa, saremo costretti a costruircene uno; ma non è una cosa difficile.

È necessario innanzitutto procurarsi due supporti su cui avvolgere le nostre bobine: uno, di diametro esterno 1 cm, su cui avvolgeremo il nostro primario, composto da uno strato di tante spire di filo smaltato da 0.2 mm, quanto bastano a ottenere un avvolgimento lungo circa 2 cm; l'altro, di dia-

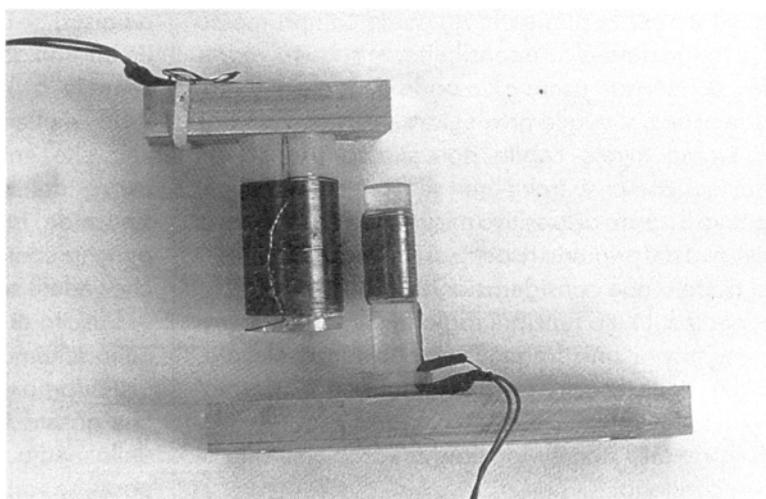


figura 3 - Come si presenta il nostro sensore: ovviamente il primario (bobina a destra) deve entrare nel secondario per poter funzionare.

metro esterno 2 cm (e cavo all'interno), su cui avvolgeremo i due secondari, sempre con filo da 0.2 mm, quanto basta per ottenere una bobina di lunghezza totale di circa 3 cm.

Si badi bene: queste due bobine secondarie conviene avvolgerle nello stesso senso; si ottengono quindi 4 fili, che provvederemo a collegare tra loro in modo da avere un avvolgimento in controfase rispetto all'altro; è semplice: un filo che "entra" è l'inizio della prima bobina (filo n.1); circa a metà (1,5 cm) finisce (filo n.2); nello stesso punto e con lo stesso verso di rotazione comincia la seconda bobina (filo n.3); in fondo (3 cm) finisce (filo n.4); adesso basta collegare il filo n.1 con il filo n.3, e dimenticarsene; ci rimangono in mano il filo n.2 ed il n.4, che saranno i nostri capi del secondario dal quale otterremo il segnale voluto.

Non preoccupatevi della precisione con cui fate questo lavoro: l'unità di misura è quella chiamata "spannometrica", se è il caso affinerete la vostra tecnologia in futuro, dopo aver preso confidenza con l'oggetto.

In figura 3 potete vedere un esemplare di L.V.D.T. casareccio: a destra il primario e a sinistra il secondario; nell'uso il primario "entra" nel secondario. Notate anche come il primario sia lungo circa 2/3 del secondario: questa è la condizione

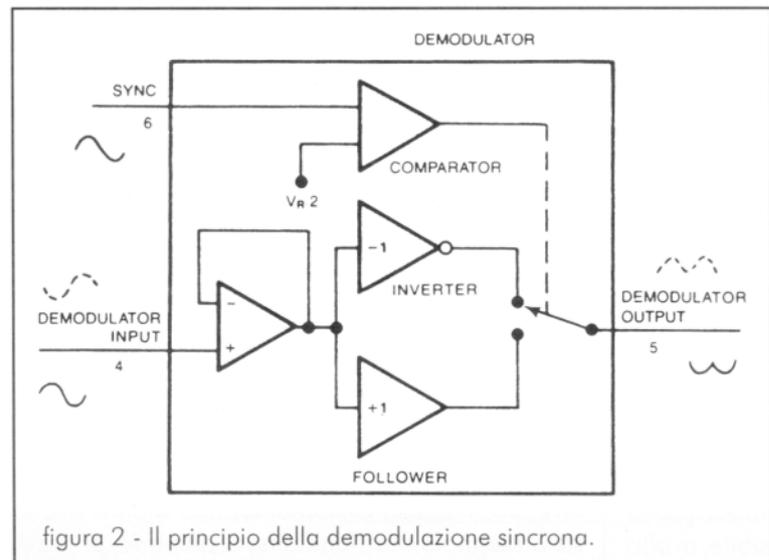


figura 2 - Il principio della demodulazione sincrona.



migliore per le prime prove, come compromesso tra range dinamico e sensibilità; in seguito vedremo che sensori usare a seconda di quale di questi due aspetti si voglia privilegiare.

Come avrete capito non stiamo usando un nucleo come si trova nei sensori commerciali; quindi il nostro dispositivo misurerà lo spostamento relativo del primario rispetto al secondario. Questo ci porta a due considerazioni:

- perché il tutto funzioni ragionevolmente, dovremo usare una frequenza abbastanza elevata, altrimenti il nostro trasformatore non "trasforma" un bel niente;
- il primario non è vincolato meccanicamente al secondario.

Sofferamoci su quest'ultimo aspetto: se avessimo usato un sensore commerciale, avremmo avuto un'asta solidale al nucleo; quindi niente spostamenti che non siano rigorosamente assiali! Se ad esempio abbiamo una crepa nel muro e vogliamo vedere nel tempo di quanto si sposta, con il nostro sensore possiamo farlo allegramente, perché se i due lembi del muro oltre che allontanarsi si spostano in altre direzioni, abbiamo circa mezzo centimetro di margine prima che la bobina interna (il primario) vada a toccare l'interno della bobina esterna (il secondario).

Se invece abbiamo un sistema oscillante (molla che sostiene un peso) e vogliamo misurare frequenza e Q, basta dare un piccolo colpo ed il nostro sensore ci darà senza problemi tutte le informazioni necessarie; per giunta senza alterare le misure con attriti vari.

Elettronica

Di cosa abbiamo bisogno in questo caso?

Per iniziare con uno schema semplice, ci serve:

- un oscillatore a circa 10 kHz, decentemente stabile in ampiezza;
- un amplificatore a basso rumore (esattamente a bassa tensione di rumore);
- uno sfasatore;
- un interruttore elettronico comandato dal segnale a 10 kHz,
- un circuito di uscita che funzioni da filtro passa basso e da amplificatore;

Andiamo allora a vedere in figura 4 lo schema elettrico che ne viene fuori.

Per praticità e per il discorso che l'ampiezza della sinusoide deve essere il più stabile possibile, in alto

a sinistra c'è un oscillatore ad onda quadra, costruito attorno ad un flip-flop (74LS14), che genera un segnale a 16 kHz. Dividendo per due con un 74LS74 otteniamo il nostro segnale principale ad 8 kHz, che, entrato nella base del transistor, Q1 ne uscirà dal collettore molto più simile ad una sinusoide; tramite C3 possiamo bloccare la componente continua, ed inviarlo al primario del sensore che vedete schematizzato in basso a sinistra.

L'uscita di questo viene amplificata da U3, che nello schema è segnato come un LT1028.

Apriamo una piccola parentesi: mi rendo conto che questo tipo di integrato, oltre a costare più della media, è anche di difficile reperibilità; d'altra parte, se vogliamo amplificare piccoli segnali senza aggiungere rumore, non se ne può fare a meno. Una valida alternativa (al prezzo di un rumore in tensione tre volte più alto) è un integrato che si chiama OP37; comunque, per cominciare potete anche metterci una "ciofeca" di 741; se tutto funziona poi passerete a materiale più pregiato.

L'obiettivo è avere un amplificatore con il più basso rumore in tensione (nV/\sqrt{Hz}) alla frequenza di 8 kHz, e che possa anche amplificare 1000 a questa frequenza (ovvero che abbia una banda di almeno 10 MHz); se quindi usate un 741 per le prove, badate almeno di ridurre la sua amplificazione portando R6 a 5,6 k Ω , poi dimezzate la frequenza di clock e portate C4 a 10 nF.

Torniamo a bomba: all'uscita dell'amplificatore per mille, troviamo il gruppo C4 e R7 che si occupano di non fare passare la continua eventualmente presente all'uscita di U3, ed il gruppo R8 e C5 che filtra passa basso in maniera blanda il segnale; ovviamente la frequenza di 8 kHz passa inalterata.

Dopo abbiamo U4b, che bufferizza ed amplifica per 2, e U4a che inverte il segnale di U4b lasciando inalterata l'ampiezza.

A questo punto, il pezzo forte, U5: questi non è altro che un commutatore elettronico CMOS, che manda alternativamente il segnale di U4b a massa (pin 13) o verso U4c; lo stesso con il segnale di U4a, solo che in questo caso la condizione è invertita.

Per intenderci meglio: quando il segnale sul pin 10 (ingresso del clock) è alto allora passa il segnale non invertito, quando è basso passa il segnale invertito; il clock, ovviamente, non è altro che lo stesso segnale che mandiamo al primario, prima di

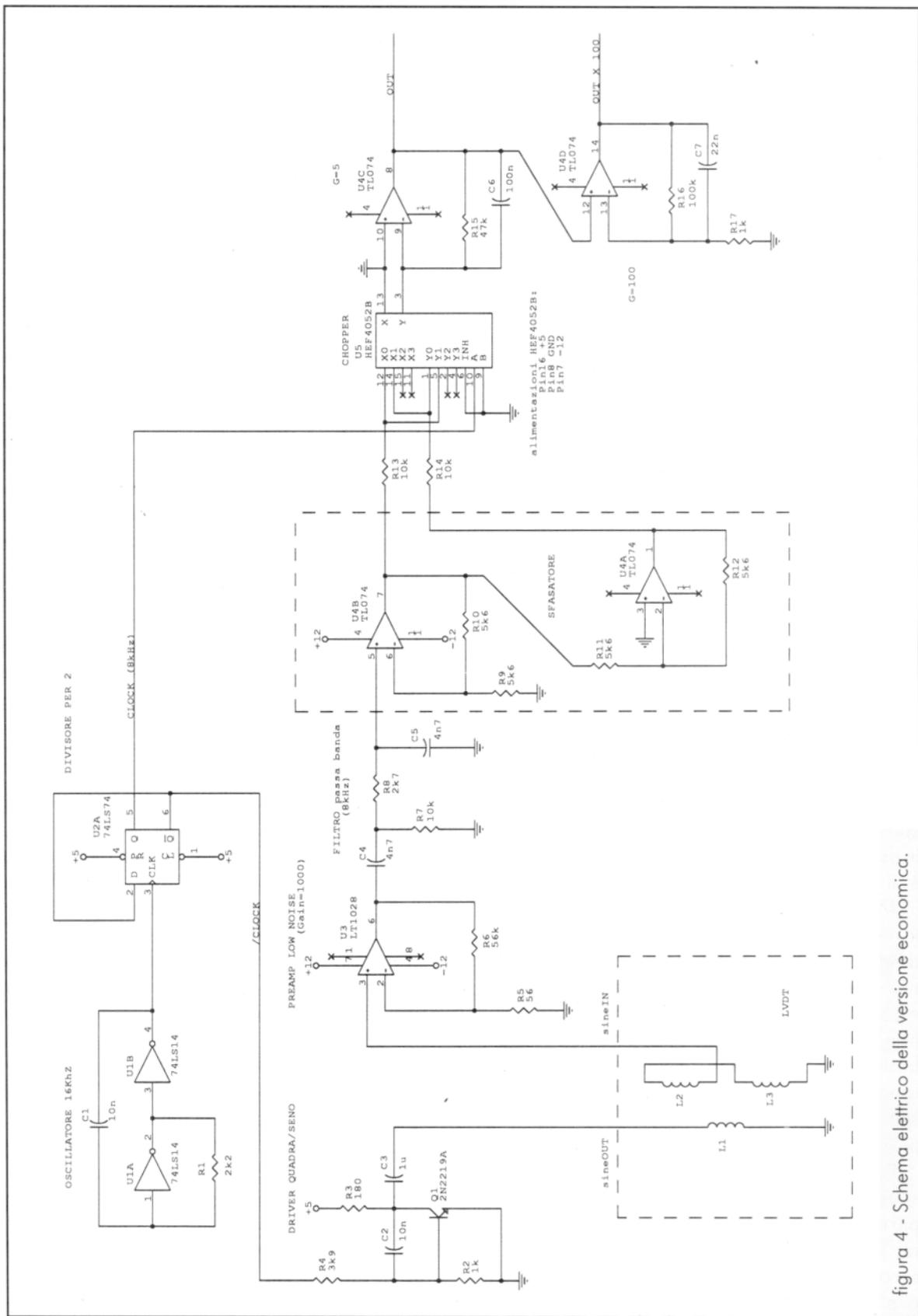


figura 4 - Schema elettrico della versione economica.



essere reso sinusoidale.

Notate le due resistenze da 10 k Ω all'ingresso di U5: avremmo potuto anche non mettercele, e collegarne una sola all'ingresso di U4c, come in tutti gli schemi tradizionali di amplificatori invertenti, ma così facendo avremmo anche cortocircuitato a massa una delle uscite (U4b oppure U4a) ad ogni colpo di clock, con conseguenze nefaste sul recovery time di questo quadruplo operativo; in questa maniera si evita elegantemente il problema.

Non rimane adesso che parlare di U4c e U4d, che vengono usati come amplificatori rispettivamente per 5 e per 100, brutalmente filtrati da C6 e C7: in alto avremo un segnale poco amplificato, e che quindi non saturerà nemmeno con grossi spostamenti dell'L.V.D.T.; in basso un segnale 100 volte più grande, da usare normalmente dopo un aggiustamento iniziale del sensore.

Il gioco è fatto, ed in maniera semplice.

Dovete solo aggiungere un 7812, un 7912 ed un 7805 per fare funzionare il tutto. Usate cavi schermati per connettere il sensore, ed in uscita sarebbe bene collegare un oscilloscopio regolato a circa 2 V a divisione: vedrete, muovendo il primario dentro al secondario, che la tensione varierà da circa -8 V a circa 8 V.

A questo punto sarebbe bene "calibrare" l'oggetto, per sapere cosa esattamente stiamo leggendo: la prima cosa da fare è spostare il sensore di una quantità nota, e vedere ad una delle uscite di quanto cambia la tensione; mettiamo che per uno spostamento di 1 mm si ottenga 1 V di variazione in uscita, allora la sensibilità del nostro accrocchio è di 1 kV/metro.

Meglio ancora se tracciate un grafico per punti, in modo da capire fino a quando il sensore risponde in maniera lineare: agli estremi, infatti, accadono cose strane (la tensione invece di salire scende), e questo ci dice che la bobina centrale (il primario) non "vede" più uno dei due secondari. Poco male, basta saperlo, e limitare l'uso dell'oggetto dentro il range di funzionamento ottimale; se servono spostamenti più grandi bisogna costruire bobine più lunghe.

Poi non sarebbe male capire qual è il minimo spostamento rilevabile: questa è una cosa un po' più difficile, è necessario fare una misura di rumore: per primo dovete "inchiodare" il primario al secondario, in modo che non si possano muovere; o più semplicemente scollegate il primario dal

segnale, e lasciate collegato il solo secondario.

Poi regolate l'oscilloscopio al massimo di sensibilità, eventualmente accoppiato in AC se ci fosse un residuo di continua che manda fuori schermo la traccia. Ovviamente il minimo segnale che potrete leggere in condizioni di funzionamento sarà perlomeno uguale (o meglio maggiore) del rumore di fondo letto in queste condizioni.

Conoscendo la sensibilità (in volt per metro), potrete dire qual è il minimo spostamento apprezzabile (sempre in volt per metro).

In realtà questo rumore dipende dalla banda di analisi (nel nostro caso definita dal filtro in uscita, un passa basso a circa 30 Hz); se non vi interessa misurare variazioni veloci, potete aggiungere filtri a piacere riducendo in questo modo il rumore.

In ambito professionale, il rumore si misura riferito ad una banda convenzionale di 1 Hz, e tutte le misure si chiamano di "densità spettrale di rumore"; nel nostro caso, e con questo schema semplice, possiamo sperare in una risoluzione di circa 10^{-8} m / $\sqrt{\text{Hz}}$.

E se volessimo di più?

Si può fare in diversi modi. Il primo (il più facile) consiste nell'aumentare il livello della sinusoide che si manda al primario: più alto infatti è questo segnale, e meglio domineremo il rumore del primo stadio di amplificazione, che al momento è il nostro limite.

Poi si può giocare con i rapporti di trasformazione del sensore.

Tutto questo però ci porta ad una diminuzione della dinamica (è il rovescio della medaglia), e quindi potremo farlo solo se siamo interessati a piccoli spostamenti intorno allo zero.

Non bisogna dimenticare poi la dipendenza delle misure dalle variazioni di ampiezza della sinusoide; per tutti questi motivi conviene cambiare schema, e passare a qualcosa di più raffinato.

In particolare, la Philips commercializza un integrato che è nato apposta per queste funzioni: si chiama NE5521, e lo potete ammirare in figura 5.

In questo chip c'è tutto quello di cui abbiamo bisogno, ma poiché siamo dei perfezionisti aggiungiamo U2 (in alto a destra), che serve a preamplificare a basso rumore, questa volta in differenziale puro, e aggiungiamo pure tutto il gruppo formato da U3 e U4 in basso a destra. Questi componenti in particolare servono a ge-

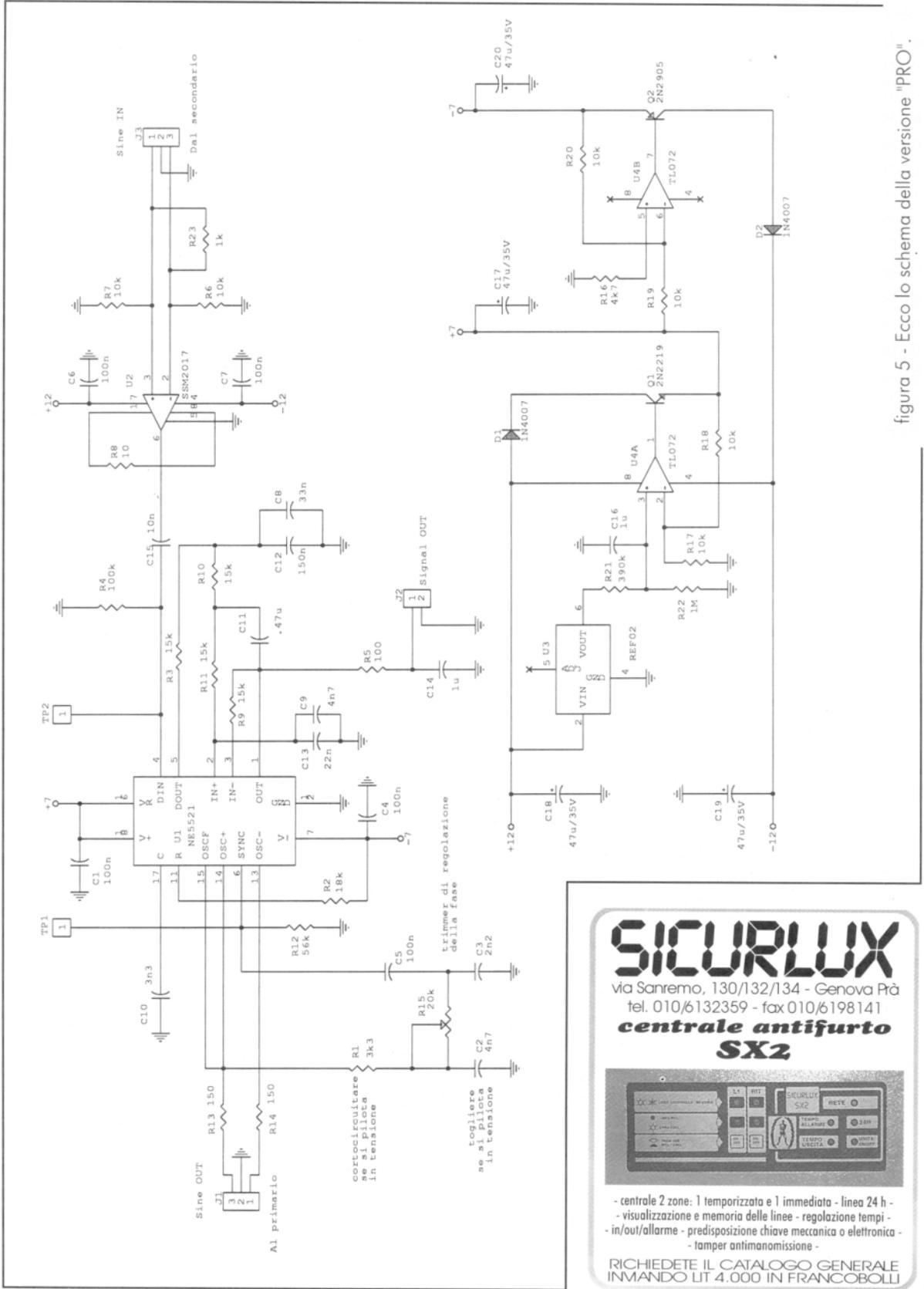


figura 5 - Ecco lo schema della versione "PRO".

SICURLUX
 via Sanremo, 130/132/134 - Genova Prà
 tel. 010/6132359 - fax 010/6198141
centrale antifurto SX2

- centrale 2 zone: 1 temporizzata e 1 immediata - linea 24 h -
 - visualizzazione e memoria delle linee - regolazione tempi -
 - in/out/allarme - predisposizione chiave meccanica o elettronica -
 - tamper antimanomissione -

RICHIEDETE IL CATALOGO GENERALE INVIANDO LIT 4.000 IN FRANCOBOLLI



nerare due tensioni (+7 e -7) particolarmente stabili, in modo da alimentare al meglio il nostro circuito.

Ormai che avete capito il funzionamento di base, c'è poco da aggiungere: tutti i componenti a destra del chip Philips (R3, R5, R9, R10, R11 e condensatori annessi) formano un filtro passa basso del quarto ordine, con frequenza di taglio poco meno di 100 Hz.

Il trimmer R15 è invece una novità: serve a "rifasare" il segnale di ritorno dal sensore rispetto al segnale di clock; può accadere infatti, per vari motivi (cavi lunghi, pilotaggi del primario in tensione o corrente, filtri sul percorso del segnale) che il segnale di ritorno non sia esattamente a 0 o a 180 gradi rispetto al segnale inviato; in queste condizioni si introduce un errore di rivelazione che contribuisce a peggiorare la sensibilità dell'oggetto.

Per aggiustare le cose basta mettere un oscilloscopio a doppia traccia nei test points TP1 e TP2: muovendo il sensore vedremo il segnale su TP2 che varia in ampiezza; mettiamoci in condizione di avere un segnale pari a quello su TP1, e regoliamo il trimmer fino ad avere uno sfasamento di 0 o di 180 gradi esatti. Se ciò non fosse possibile (perché magari il primario ha molte spire, e quindi stiamo pilotando in tensione invece che in corrente), allora conviene cortocircuitare R1 e scollegare

C2; in questa maniera abbiamo tolto 90 gradi di sfasamento, e sicuramente con il trimmer R15 riportiamo in passo il tutto.

Per misurare la fase è necessario settare l'oscilloscopio in modalità "chopper", e sincronizzare su TP1.

Il condensatore C10 definisce la frequenza di oscillazione, ed il massimo accettabile con questo chip è di 20 kHz. L'integrato U2 è particolare, un SSM2017, nato per applicazioni differenziali a basso rumore; se non avete di queste esigenze, tornate pure al vecchio LT1028. Per i collegamenti al sensore il non plus ultra è un cavo bifilare twistato e schermato, con la calza semplicemente connessa a massa dal lato dell'elettronica.

In figura 6 potete ammirare il prototipo di una scheda a sei canali indipendenti, realizzata per controllare il microcip di alcune molle a lama sottoposte a variazioni di temperatura.

In questo caso, dato il notevole assorbimento, i transistor della stabilizzazione a 7 V sono stati adeguatamente alettati.

Applicazioni pratiche

Del misuratore di fessure nei muri ho già parlato, attenti a misurare veramente lo spostamento della crepa e non le dilatazioni termiche del sensore; quando si fanno misure sottoposte a sbalzi di temperatura notevoli, si dovrebbe avvolgere le bobine su materiali poco sensibili ai delta termici. Comunque conviene sempre lavorare nei dintorni dello zero, per avere la massima sensibilità dello strumento con cui si legge lo spostamento relativo.

Per avere un accelerometro molto sensibile basta costruirsi un pendolo invertito, con frequenza di risonanza di qualche Hertz; usare il sensore di spostamento (primario vincolato all'equipaggio mobile, secondario vincolato alla struttura) per generare un segnale di "errore", con il quale, tramite opportuna integrazione, operare un feedback meccanico (ad esempio su una bobina da altoparlante anch'essa vincolata all'equipaggio mobile, ed il suo magnete fissato alla struttura). La corrente necessaria a ripor-

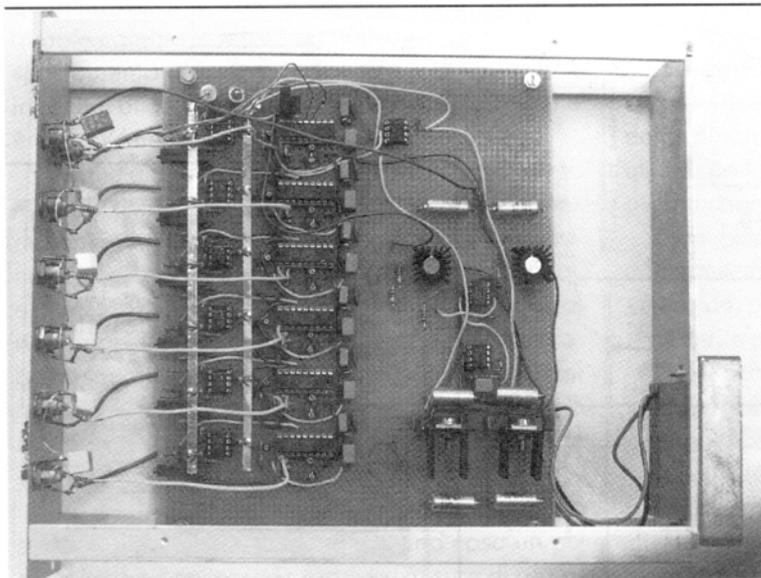


figura 6 - Questa volta è stato più difficile far entrare 6 canali in questo poco spazio (nella versione definitiva è stato deciso il montaggio di soli 4 canali per ogni scheda).



tare sullo zero il sensore, è proporzionale all'accelerazione subita da tutto il complesso, e questo è quello che si chiama "accelerometro a bilanciamento di forze".

Non sono stato chiaro?

Va bene, sono argomenti che richiederebbero molto spazio, vedremo se è il caso di riparlare.

Altre applicazioni: al posto del sensore fatto con le bobine, è possibile eccitare un ponte di Weathstone, e leggere il suo sbilanciamento; in questa maniera la lettura viene fatta a 10 kHz, non in continua come di solito, svincolandoci così da tutte le problematiche inerenti al rumore 1/f (che come è noto aumenta al diminuire della frequenza).

Non parliamo poi di usare come "primario" un LED e come secondario due fotodiodi opportunamente connessi: abbiamo ottenuto uno "shadowmeter" insensibile al rumore 1/f ma anche alle variazioni della luce ambientale.

E per ultimo (la mia anima audiofila reclama vendetta), pensate a cosa significa poter leggere senza contatto fisico tutte le risonanze del braccio di un giradischi, oppure della frequenza di risonanza propria della struttura che sostiene il vostro

mega impianto Hi-Fi.

Per non parlare di un feedback leggendo lo spostamento del woofer delle vostre casse acustiche, e correggendo alla fonte (ingresso dell'amplificatore) eventuali distorsioni, magari tramite un DSP. DSP certo, ma con stadio di uscita a valvole...

Bibliografia

Gran parte del materiale è stato tratto dal data-book IC11 (linear products Philips) del 1989: da pagina 663 a pagina 714 è una fonte inesauribile.

Altre idee sono parto della mente di Diego Passuello (la nostra CPU umana), in particolare il primo schema proposto.

Supporto morale e soluzioni ai quesiti più disparati sono merito di Alberto Gennai.

Per qualunque spiegazione, aiuto, consiglio, etc. sono a vostra disposizione tramite la rivista o al seguente indirizzo di posta elettronica:

federico @ axpia.pi.infn.it

"Van Helsing non mi fa paura!"

...un soffio di vento, e la porta si chiuse.



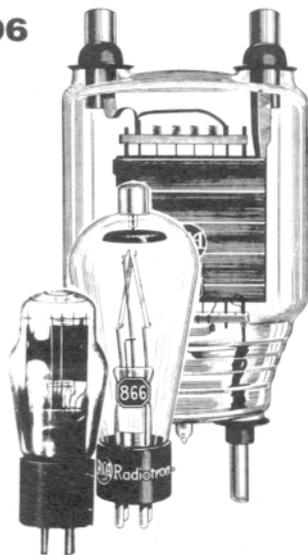
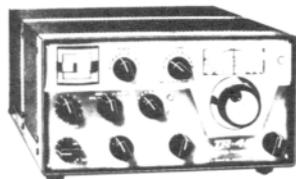
PORDENONE
QUARTIERE FIERISTICO

PATROCINIO ENTE FIERA PORDENONE

5 - 6 OTTOBRE 1996

19° EHS

**ELETRONICA E "SURPLUS"
PER RADIOAMATORI E CB
MOSTRA MERCATO**



12^a ARES

**MILITARIA
MOSTRA MERCATO**

**COLLEZIONISMO
STORICO**

ORARIO: 9.00 - 18.30

INFORMAZIONI E PRENOTAZIONI STAND

SEGRETERIA EHS - VIA BRAZZACCO 4/2 - 33100 UDINE - TEL. E FAX 0432/546635 - Periodo Fiera 0434 / 232111