

Relazione tecnica

Sensore di misura della corrente per applicazioni in alta tensione

Introduzione

Nei Laboratori Nazionali di Fisica Nucleare a Frascati è in fase di sviluppo e test un apparato costituito da strati di ferro e rivelatori di particelle altamente sensibili. Tale apparato ha lo scopo di rivelare particelle fondamentali con particolare attenzione allo studio e alla eventuale rivelazione del Bosone di Higgs.

Questo tipo di ricerca avviene con l'aiuto di grandi macchine acceleratrici in questo caso "al CERN di Ginevra" dove è in costruzione un super acceleratore di particelle chiamato LHC "Large Hadron Collider" capace di far scontrare protoni contro protoni accelerati ad altissima energia. L'energia liberata dallo scontro produce altre particelle (gran parte delle quali già note) che vengono poi studiate per mezzo di complessi apparati sperimentali come ATLAS che è l'esperimento in questione.

I rivelatori si basano sull'effetto di ionizzazione del gas prodotto dalle particelle passanti e permettono la misura dell'energia rilasciata dalle particelle stesse. Per il loro corretto funzionamento devono essere alimentati con tensioni dell'ordine di qualche kV, potenziale necessario per creare all'interno del rivelatore campi elettrici, sufficientemente intensi da separare gli ioni e gli elettroni generati dal processo di ionizzazione.

Al fine di determinare l'invecchiamento e monitorare il buon funzionamento del rivelatore si rende necessario misurare con precisioni e sensibilità elevate le correnti di perdita del sistema di alta tensione senza alterare la tensione di alimentazione del rivelatore. Non è quindi possibile utilizzare sistemi di lettura standard come ad esempio lettori differenziali di tensione su caduta resistiva che produrrebbero inaccettabili alterazioni della tensione del rivelatore.

Per soddisfare quindi l'esigenze del rivelatore, proponiamo un lettore di corrente di concezione innovativa in grado di misurare una corrente tramite una caduta di potenziale di appena 600mV pressoché costante sull'intero range di misura; garantendo inoltre una eccellente linearità e una sensibilità molto elevata.

Particolare cura è stata posta nell'ingegnerizzazione del sistema in modo da garantire alta affidabilità e bassi costi, visto l'elevato numero di canali necessari alla realizzazione dell'opera.

Funzionamento

Il circuito progettato è un sensore di misura della corrente media assorbita da un

carico e misura differenziale della corrente stessa ai capi di una coppia di capacità di elevata precisione.

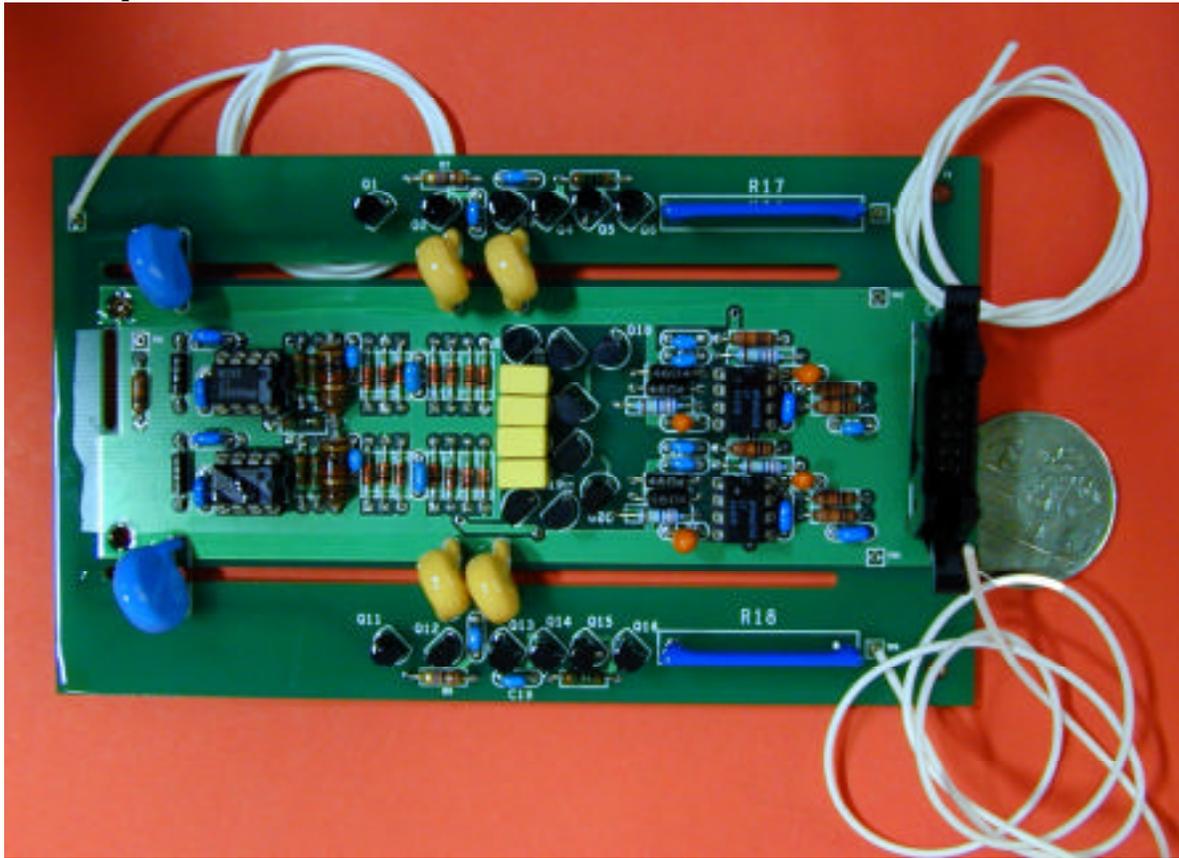
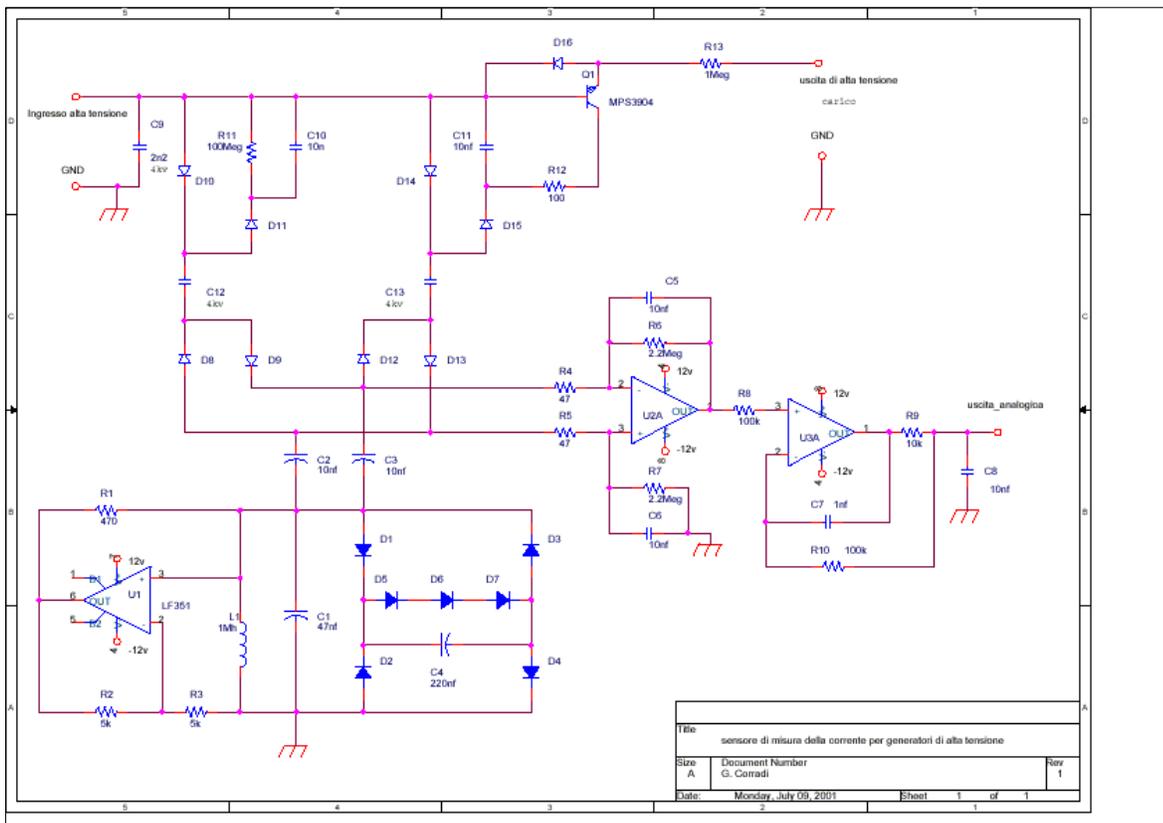


fig.1



Nella figura 2 è riportato lo schema elettrico di un canale di lettura mentre in fig.1 è riportata la foto del circuito, realizzato con componenti discreti.
 In fig.3 è riportato lo schema a blocchi, che di seguito descriveremo

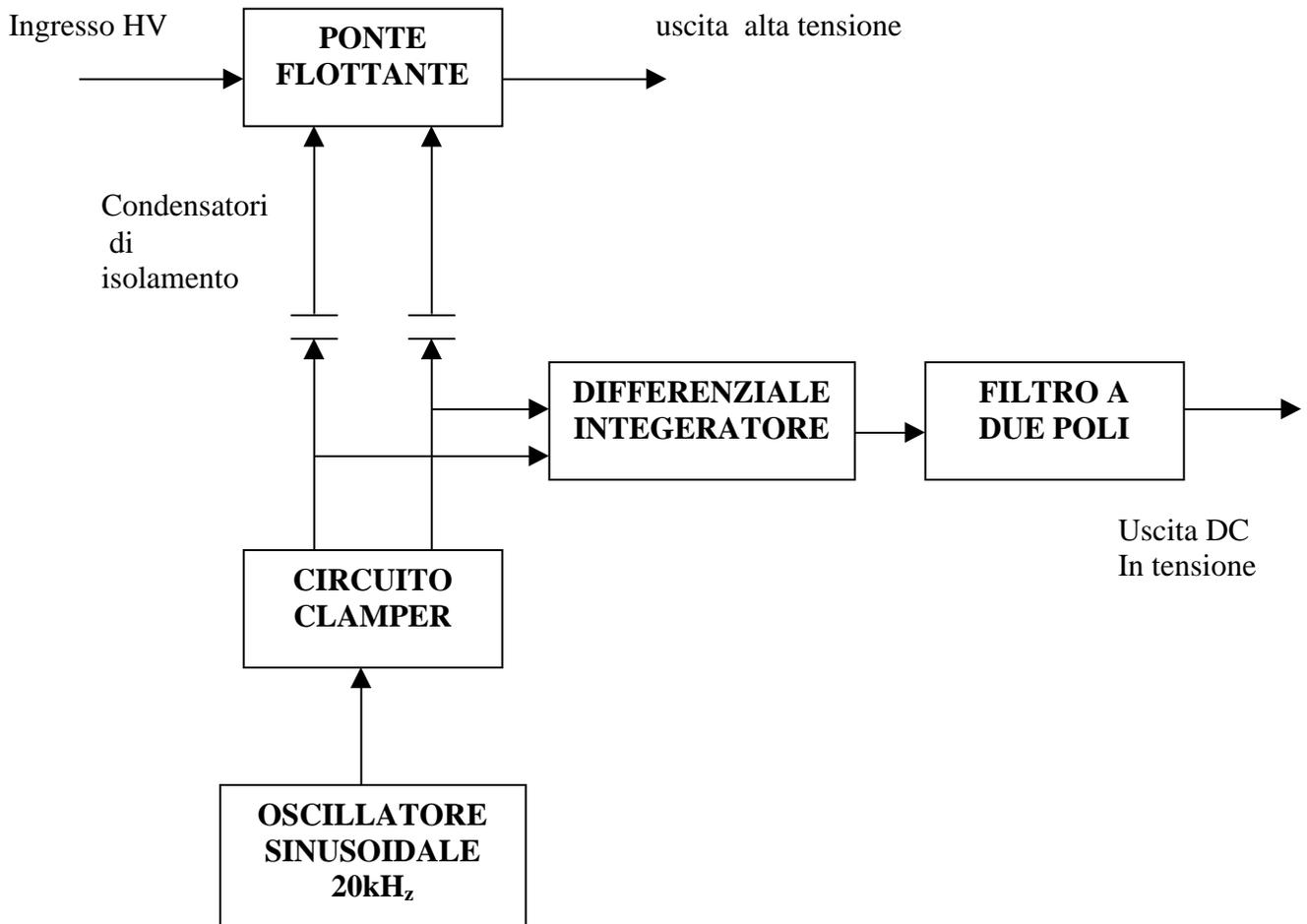


fig.3

Come visibile dallo schema a blocchi, il sistema di lettura si basa su:

- di un ponte flottante, necessario all'iniezione di corrente nel carico di uscita
- un oscillatore sinusoidale a 20kHz, necessario a fornire l'energia al ponte flottante tramite due capacità d'isolamento, che separano l'alta tensione dal circuito di lettura
- un differenziale necessario alla misura differenziale di carica iniettata, rispetto ad una serie di riferimento

L'oscillatore

Si definisce oscillatore un circuito in grado di generare una forma d'onda qualsiasi, senza alcun segnale applicato in ingresso. La forma d'onda generata ha una certa ampiezza V_m , che si misura in Volt, una certa frequenza f_0 , che si misura in Hertz, e un certo periodo T , che si misura in secondi. Tra la frequenza ed il periodo esiste la seguente relazione:

$$f_0 = 1/T$$

Nel nostro caso abbiamo un oscillatore sinusoidale la cui frequenza d'uscita è di 20 KHz ed è definita da L_2 , C_{14} , e C_{15} (vedi schema elettrico) tramite la relazione:

$$f_0 = 1/2 \sqrt{LC}$$

$$\text{dove: } L=L_1 \quad \text{e} \quad C=C_1 + C_2 + C_3$$

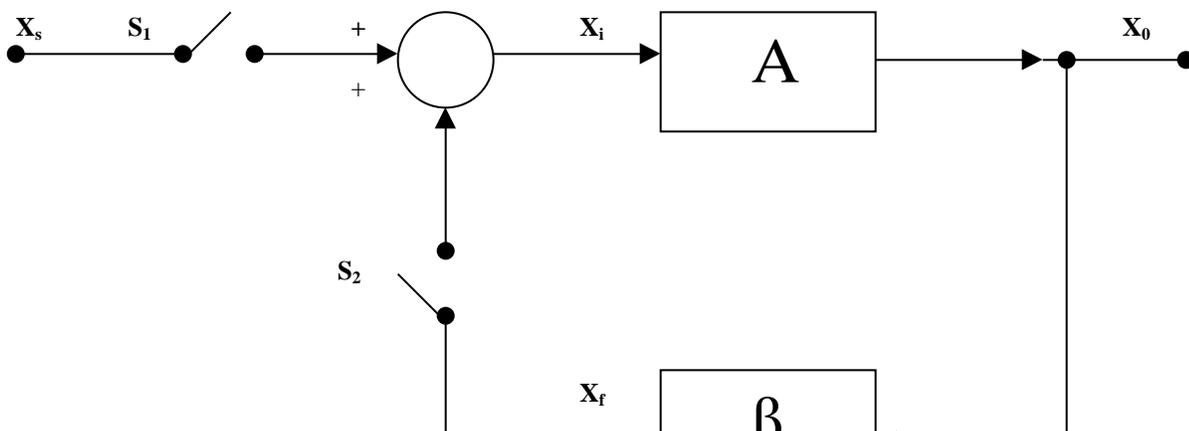
Bisogna ricordare che gli oscillatori non forniscono mai una forma d'onda perfetta, e vengono definiti come circuiti autonomi in quanto non si prevede la necessità di un segnale d'ingresso, ma il loro innesco dipende solo e soltanto dal rumore intrinseco dei dispositivi attivi e passivi che si trovano nell'anello di reazione.

L'oscillazione si innesca a seguito del rumore e viene mantenuta ad ampiezza costante tramite la rete di reazione R_2 e R_3 ved.fig2.

Le perdite dissipative del circuito risonante L_1 , C_1 vengono compensate tramite il resistore R_1 che genera una resistenza negativa.

La proprietà fondamentale di un oscillatore è costituita dalla instabilità. Le condizioni necessarie per ottenere in uscita una oscillazione di ampiezza costante sono:

$$1) \quad \beta A = 0 \quad \text{e} \quad 2) \quad |A| = 1$$



Queste regole sono note come condizioni di Barkhausen e costituiscono una base sufficiente per l'analisi del funzionamento e per il dimensionamento della maggior parte dei circuiti pratici oscillanti, in quanto:

- 1) determina la frequenza di oscillazione f_0
- 2) permette di stabilire i criteri per la scelta dei componenti attivi.

Inoltre al fine di ottenere l'autoinnescamento delle oscillazioni alla frequenza f_0 si deve prevedere nel funzionamento lineare iniziale un guadagno ad anello $|A|$ maggiore a uno.

Successivamente, col crescere dell'ampiezza di oscillazione, la diminuzione di A causata dai fenomeni di non linearità riporta gradualmente il valore $|A|$ a uno con conseguente stabilizzazione delle ampiezza, tenendo ovviamente conto che l'oscillatore deve anche fornire corrente al carico di uscita vedi fig.4 e fig.5.

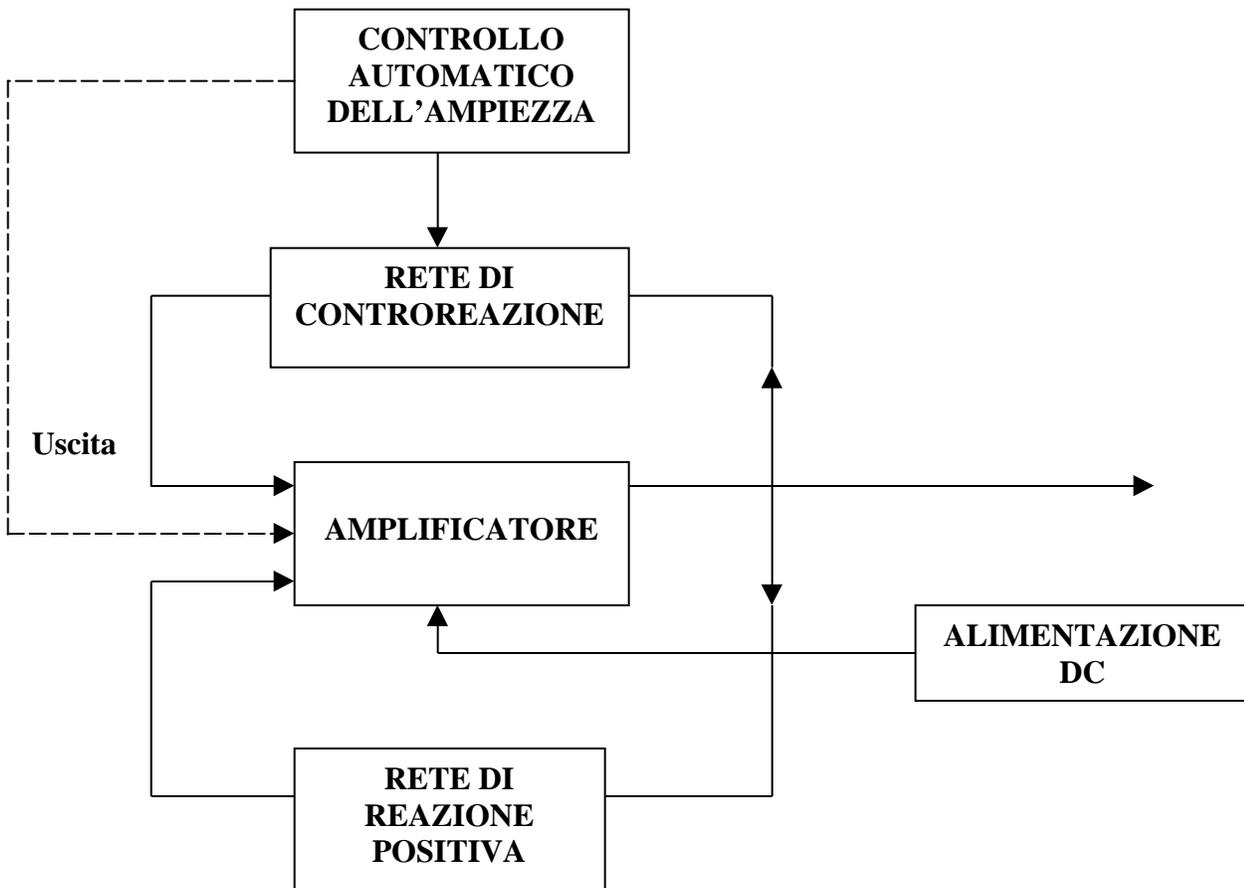


Fig 5

CIRCUITO DI CLAMPER

I circuiti clamper, detti anche fissatori, hanno la caratteristica di tenere fisso il valore massimo o minimo del segnale d'uscita ad un livello determinato di tensione. Nel nostro caso il circuito ha la seguente configurazione (fig 6):

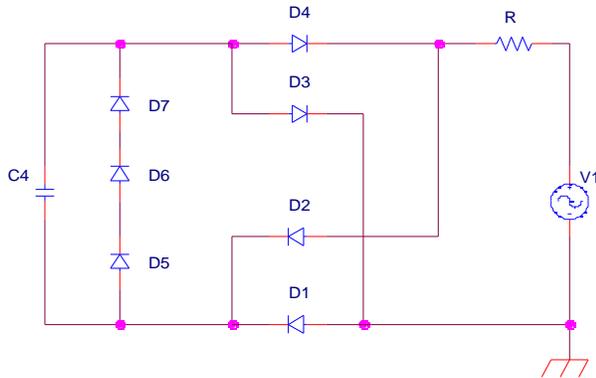


fig 6

I diodi D5, D6 e D7 hanno la funzione di limitare la tensione di carica ai capi di C4 pari a $3 \times 650\text{mV}$ ed è quindi equivalente ad un generatore di tensione. Lo scopo di ciò è di generare una tensione di riferimento stabile pari a $V_{\text{ref}} = V_{\text{s5}} + V_{\text{s6}} + V_{\text{s7}} = 1.95 \text{ V}$. Il condensatore C4 viene utilizzato per memorizzare la tensione con una costante di tempo sufficientemente lunga in modo da eliminare il noise presente quando i diodi entrano in conduzione.

Nel semiperiodo positivo:

- il diodo D2 conduce dopo aver superato i 3.2V , ovvero la somma delle tensioni dei diodi della maglia presa in considerazione, per cui il segnale sinusoidale generato dall'oscillatore si "clampa" a tale tensione che rimane costante per i successivi cicli.

Nel semiperiodo negativo:

- il diodo D4 conduce quando sul catodo si raggiunge una tensione inferiore a -3.2V quindi anche la semionda negativa viene clampata.

Con questa tecnica si garantisce l'ampiezza di uscita costante a una tensione di circa $4V_{\text{pp}}$ indipendentemente dalla tensione di alimentazione.

AMPLIFICATORE DIFFERENZIALE

Per amplificatore differenziale si intende un circuito in grado di amplificare la differenza tra due segnali d'ingresso permettendo quindi di ottenere una tensione in uscita proporzionale alla differenza dei medesimi.

Il pregio di usare un amplificatore differenziale è quello di amplificare la differenza dei segnali in ingresso in modo virtuale, ottengono così grandi amplificazioni con elevata reiezione ai disturbi di modo comune.

Il circuito presenta un polo dominante circa 15 volte più grande dell'inverso della frequenza dell'oscillatore sinusoidale, determinato da R6 e C5 ved. Fig.7, necessario per evitare che il segnale spurio dell'oscillatore interferisca con l'uscita analogica.

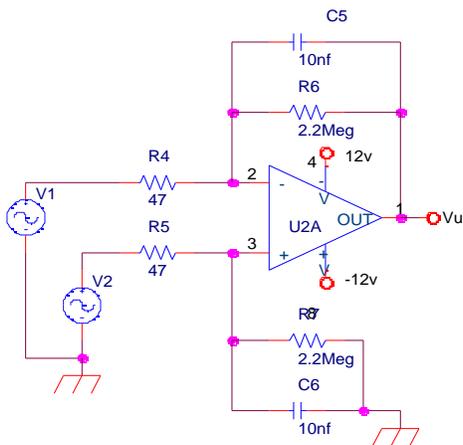


fig.7

In figura 7 è visibile il circuito elettrico dell'amplificatore differenziale.

La rete è risolvibile applicando il principio della sovrapposizione degli effetti:

cortocircuitando V2 si ottiene la tipica configurazione invertente, dove $V_u = -R_6/R_4 * V_1$

annullando V1 si ottiene la tipica configurazione non invertente; a causa del partitore resistivo costituito da R5 e R7 non tutta la tensione V2 viene applicata all'ingresso dell'amplificatore operazionale

Si ottiene quindi: $V_u = R_7 / (R_5 + R_7) * (1 + R_6/R_4) * V_2$

Sommando i due contributi:

$$V_u = [R_7 / (R_5 + R_7) * (1 + R_6/R_4) * V_2] - R_6/R_4 * V_1$$

Se $R_6/R_4 = R_7/R_5$ allora $V_u = R_6/R_4 * (V_2 - V_1)$

Il circuito in fig.9 è il cuore del sistema di lettura, si chiama ponte flottante perché è in grado di misurare la corrente nel carico sotto forma di tensione differenziale e tra i condensatori C10 e C11. I condensatori in questione si caricano ad una tensione di circa 4V al disopra dell'alta tensione di esercizio, C10 fornisce la tensione di riferimento, mentre C11 si carica ad un valore di tensione proporzionale alla corrente di carico.

Il circuito differenziale è in grado di misurare la differenza di tensione ai capi del ponte D8, D9, D12, D13, necessario per raddrizzare il segnale sinusoidale presente su di esso.

Ci limitiamo ad una breve descrizione, non ritenendo importanti i dettagli di funzionamento.

Per concludere, il sistema è stato montato e collaudato.

Le caratteristiche misurate sono le seguenti:

- tensione massima applicabile 6kV
- corrente massima misurabile 2.5 μ A
- risoluzione 500pA
- linearità integrale 1%
- fattore di scala 4V/ μ A
- tensione di uscita max. 11V
- frequenza dell'oscillatore 20kHz
- rumore di uscita 1mVpp è stato misurato su due canali

tutori

Giovanni Corradi & Paolo Ciambrone

Studenti

Marco Lanzillotta & Matteo Fondi

Frascati 11.07.2001