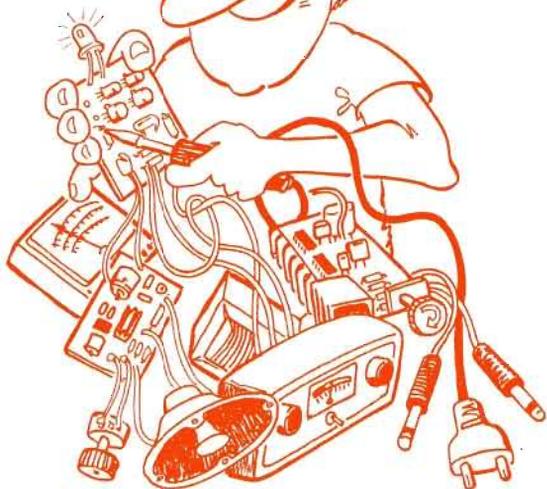


# CORSO ELEMENTARE DI ELETTRONICA



**PRIMI  
PASSI**

## **OPERAZIONALI IN ALTERNATA**

Il mese scorso, in questa stessa rubrica, è stato analizzato, nei suoi aspetti più generali, l'amplificatore operazionale integrato. In misura particolare, invece, si è argomentato sulle reazioni del componente alle diverse polarizzazioni in continua. Dunque, si deve ora esaminare lo stesso circuito attraverso alcune applicazioni in corrente alternata. Soprattutto per dimostrare come sia arduo, in questo caso, quantificare il guadagno. Ma intanto ricordiamo che, nel processo di amplificazione in continua, l'operazionale dimostra alcuni limiti, che ne condizionano le caratteristiche di impiego e che vanno attribuiti, innanzitutto, alla tensione di offset parasita, presente in ogni ingresso di ciascun componente e, in secondo luogo, all'instabilità di questa col variare della temperatura.

La tensione di offset varia tra un modello e l'altro di integrato. In quelli costosissimi, poi, raggiunge anche qualche centinaio di milionesi-

mi di volt, mentre nei normali componenti ammonta ad alcuni millesimi di volt. Dunque, ciò significa che, raggiungendo i primi un'amplificazione di centomila volte o più, oppure solamente diecimila volte i secondi, la tensione in oggetto è certamente in grado di saturare l'uscita ed il potere di amplificazione dell'operazionale cessa. Ma esiste pure il problema del rumore, che è tanto più intenso quanto più bassa è la frequenza dei segnali e più larga la loro banda. Infatti, se la frequenza si estende fino al valore di zero, la gamma diviene enorme.

Anche i fenomeni termoelettrici, presenti durante il lavoro di amplificazione in continua, provocano tensioni estranee, nelle giunzioni fra metalli diversi e queste, se fortemente amplificate, possono alterare il comportamento dell'operazionale.

In commercio esistono amplificatori operazionali con circuito di azzeramento automatico

dell'offset. Ma questi, oltre che essere costosissimi, presentano il grave svantaggio dell'introduzione di rumore. Perché il circuito di azzeramento, per quanto ottimamente concepito, provoca sempre disturbi di tensione. Possiamo quindi concludere asserendo che le forti amplificazioni sono spesso incompatibili con la banda estesa verso il basso, fino alla continua; anzi, in sede di impiego di componenti, conviene sempre escludere le frequenze di 50 Hz e 100 Hz, allo scopo di evitare la presenza di indesiderati ronzii da residui di rete.

### CONTROREAZIONE IN CONTINUA

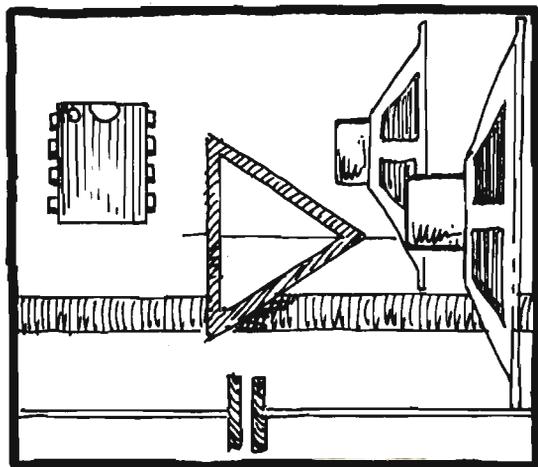
Quando si analizza un amplificatore in alternata, ci si accorge che, in realtà, è sempre disponibile una rete di controreazione in continua, dotata di caratteristiche passa basso, ottenute tramite condensatori di livellamento, a piccolo guadagno, generalmente unitario o poco di più, che stabilizza il punto di lavoro in corrente continua, ovvero in assenza di segnale, in condizioni non critiche. Una tale stabilizzazione è necessaria per attribuire all'amplificatore le qualità di massima simmetria ed efficienza generale, allo scopo di adattare ingressi ed uscite ed evitare saturazioni e distorsioni. Ma gli effetti di tale controreazione debbono annullarsi un po' prima dell'inizio della banda sulla quale opera la controreazione principale in alternata, ricordando che quella continua è di servizio. Pertanto, la reazione in alternata stabilisce il guadagno e definisce la banda passante desiderata a seconda delle necessità operative.

Generalmente si può ritenere che ad una banda più estesa corrisponda un minore guadagno e viceversa. Anche perché l'entità del rumore è inversamente proporzionale alla larghezza di banda. E ciò porta a concludere che è sempre conveniente realizzare le forti amplificazioni in banda stretta.

Quanto finora detto vale sia per impieghi degli operazionali in veste di amplificatori come di filtri attivi ed oscillatori interessati da segnali in alternata. Ma cerchiamo ora di analizzare il circuito di un classico amplificatore di segnali di bassa frequenza.

### AMPLIFICATORE BF

Poiché il circuito di figura 1 lavora in corrente



alternata, sono presenti, in entrata e in uscita, due condensatori, C1, e C2, dei quali quello d'uscita assume generalmente un valore capacitivo superiore alla capacità del primo, data la bassa impedenza d'uscita che si aggira intorno ai 400 ohm. Tuttavia, entrambi i componenti debbono disporre di una reattanza alla frequenza minore, tale da non attenuare il segnale.

L'impiego dell'entrata invertente 2 determina l'inversione del segnale in uscita, come dimostrato in figura 2.

Le resistenze R2 - R3 del circuito di figura 1 compongono un partitore di tensione, che divide a metà quella di alimentazione, per applicarla all'ingresso non invertente dell'integrato IC.

La controreazione o reazione negativa in continua, è applicata sul terminale 2, cioè all'ingresso invertente, tramite la resistenza R4. In assenza di segnale, quindi, la tensione rilevata all'uscita 6 è la stessa misurata sull'entrata 3, perché l'operazionale appare montato in una configurazione con guadagno unitario, con ingresso sul piedino 3 per la continua, tecnicamente chiamato "inseguitore di tensione".

Il segnale alternato da amplificare viene applicato all'operazionale tramite il condensatore C1, che concede via libera al segnale ma blocca la tensione continua.

Il guadagno è dato dal rapporto:

$$G = R4 : R1$$

Ovviamente si tratta di guadagno in alternata. La costante di tempo, che stabilisce da quale valore di frequenza il circuito comincia a gua-

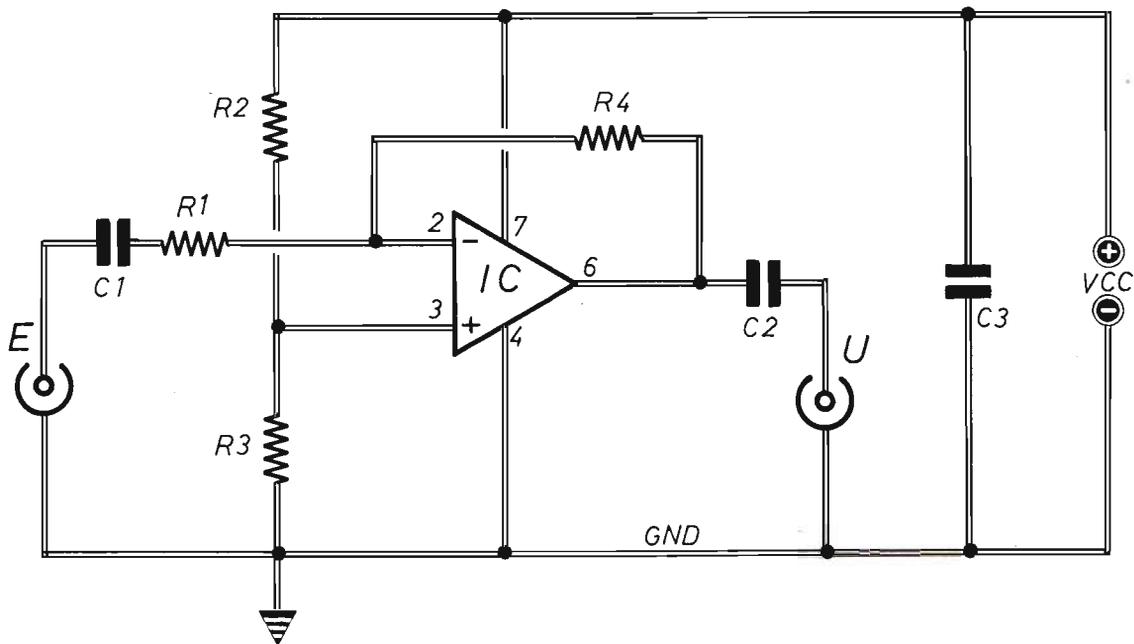


Fig. 1 - Schema teorico di amplificazione di segnali alternati di bassa frequenza che utilizza l'ingresso invertente dell'operazionale. Con la sigla GND viene segnalata la linea di massa del circuito.

## COMPONENTI

### Condensatori

- C1 = 1  $\mu$ F (non polarizzato)
- C2 = 1  $\mu$ F (non polarizzato)
- C3 = 100.000 pF

### Resistenze

- R1 = 1.000 ohm - 1/4 W
- R2 = 10.000 ohm - 1/4 W
- R3 = 10.000 ohm - 1/4 W
- R4 = 100.000 ohm - 1/4 W

### Varie

- IC =  $\mu$ A 741
- VCC = 9 Vcc

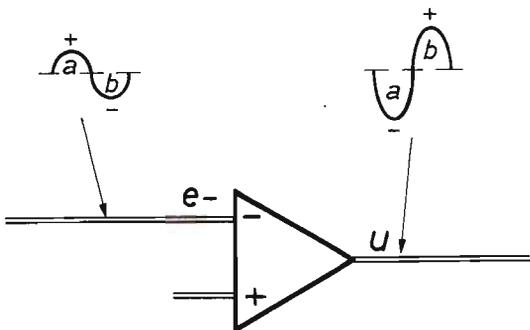


Fig. 2 - Servendosi dell'entrata invertente dell'amplificatore operazionale, il segnale in uscita appare invertito nelle sue fasi. La semionda "a", inizialmente positiva, diventa negativa in uscita ma amplificata. Questa stessa osservazione si estende alla semionda "b" della sinusoide.

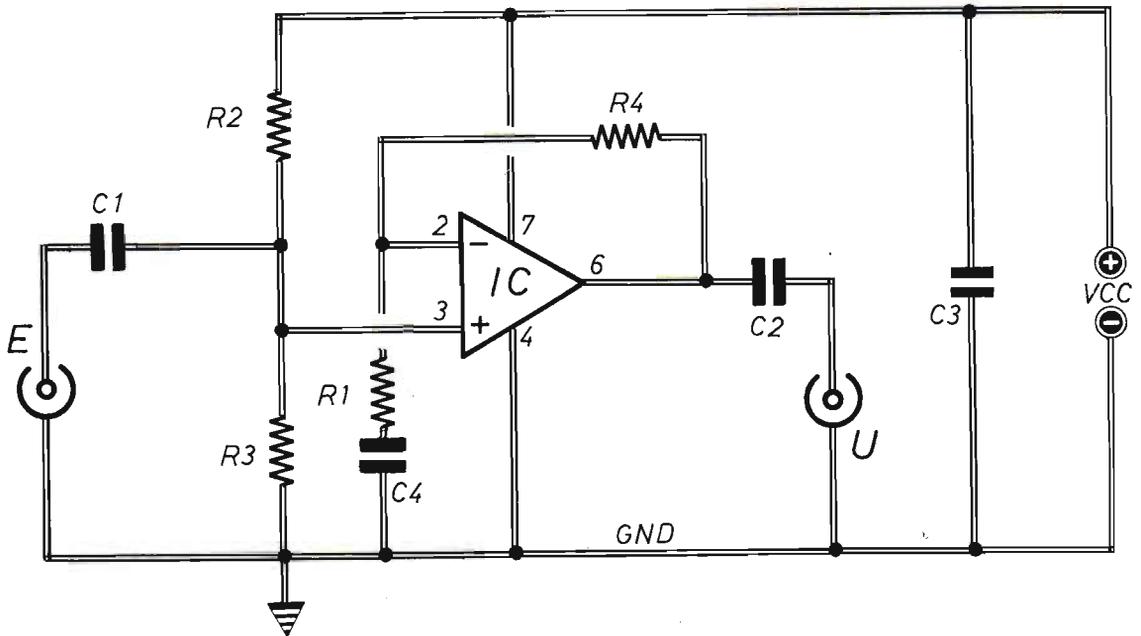


Fig. 3 - Classico esempio di circuito amplificatore in alternata di segnali di bassa frequenza, applicati all'entrata non invertente dell'integrato operazionale.

## COMPONENTI

### Condensatori

C1	=	1 $\mu$ F (non polarizzato)
C2	=	1 $\mu$ F (non polarizzato)
C3	=	100.000 pF
C4	=	1 $\mu$ F (non polarizzato)

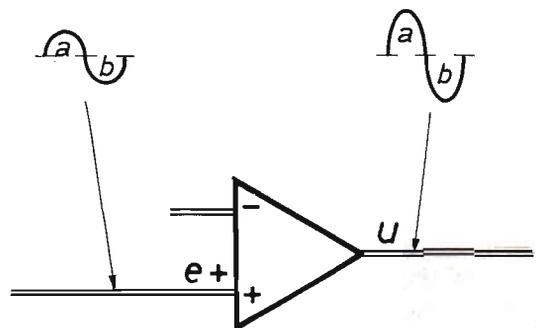
### Resistenze

R1	=	1.000 ohm - 1/4 W
R2	=	10.000 ohm - 1/4 W
R3	=	10.000 ohm - 1/4 W
R4	=	100.000 ohm - 1/4 W

### Varie

IC	=	$\mu$ A 741
VCC	=	9 Vcc

Fig. 4 - Il segnale alternato, inserito sull'ingresso non invertente dell'operazionale, si presenta nella stessa forma, ossia in fase ma amplificato, all'uscita dell'integrato.



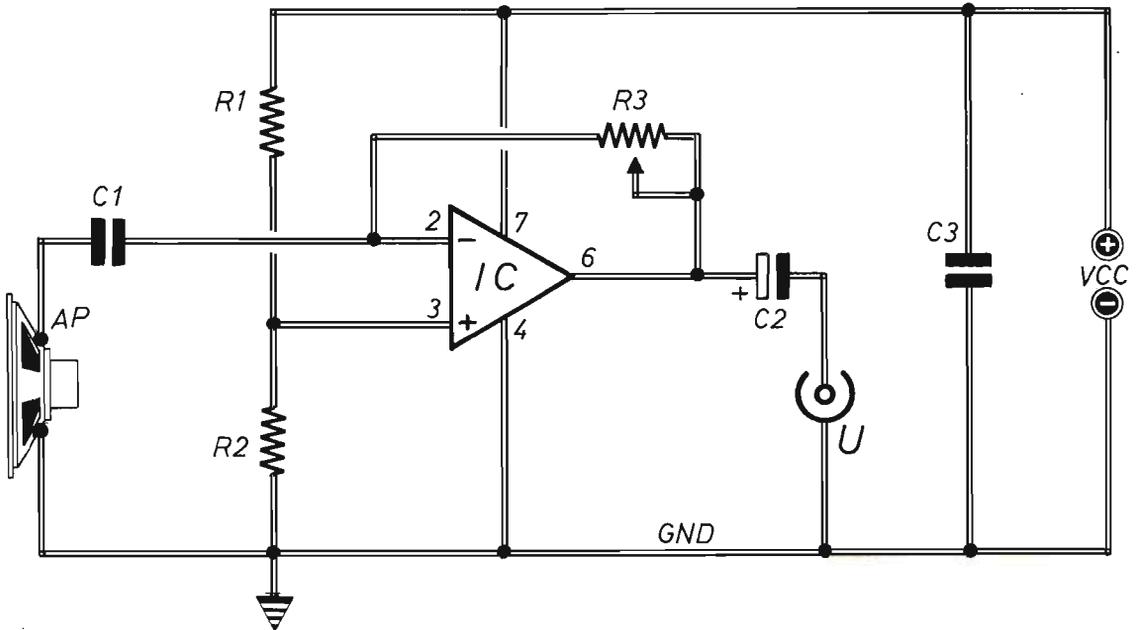


Fig. 5 - Circuito amplificatore di bassa frequenza in alternata di tipo sperimentale, ovvero con guadagno regolabile tramite il potenziometro R3 di tipo a variazione lineare.

## COMPONENTI

### Condensatori

- C1 = 1  $\mu$ F (non polarizzato)  
 C2 = 47  $\mu$ F - 16 V (elettrolitico)  
 C3 = 100.000 pF

### Resistenze

- R1 = 10.000 ohm - 1/4 W

- R2 = 10.000 ohm - 1/4 W  
 R3 = 1 megaohm (pot. lin.)

### Varie

- IC =  $\mu$ A 741  
 AP = 8 ÷ 16 ohm  
 CUFFIA = 50 ÷ 600 ohm  
 VCC = 9 Vcc

dagnare, è data dal prodotto:

$$C1 \times R1$$

Dunque, per estendere il guadagno verso il basso della banda di frequenze, occorre aumentare il prodotto  $R1 \times C1$ , ossia, in pratica, una volta stabilito il valore ohmmico di R1, si deve aumentare quello capacitivo di C1 e viceversa. Mentre per elevare il guadagno si deve aumen-

tare R4 oppure diminuire R1, o realizzare entrambi questi interventi. Ma in ogni caso non conviene superare mai, per i valori resistivi, il centinaio di migliaia di ohm, onde evitare problemi alle alte frequenze, dove anche i componenti antiinduttivi diventano sempre parzialmente induttivi. Ecco perché è più conveniente diminuire la resistenza di R1 ed aumentare la capacità di C1, se non si vuole ridurre l'estensione della banda passante.

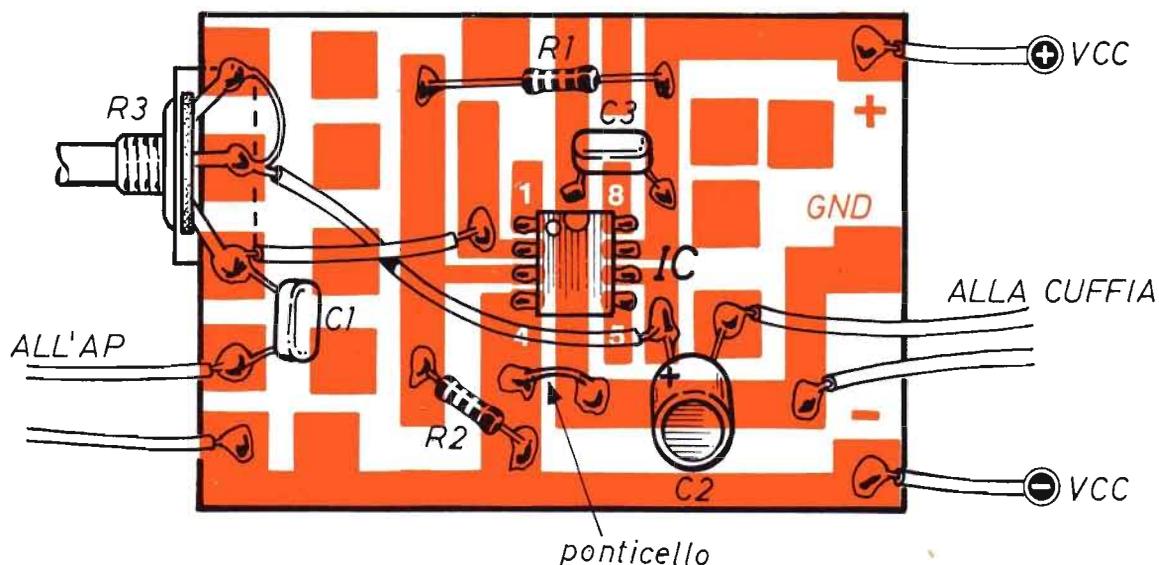


Fig. 6 - Piano realizzativo del circuito sperimentale descritto nel testo. Si noti l'originale tecnica di applicazione dei componenti sulla basetta supporto, che qui avviene direttamente sulle piste di rame.

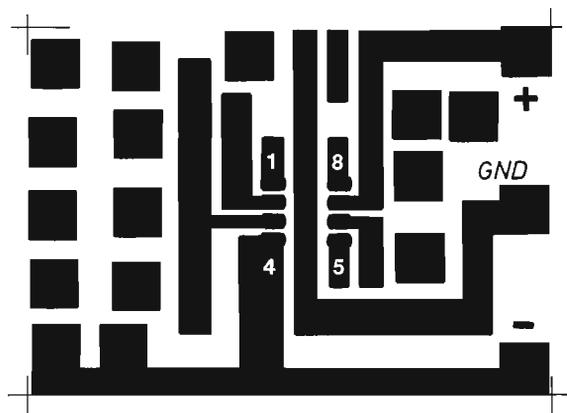


Fig. 7 - Disegno in grandezza reale del circuito stampato, da riportare su una delle due facce di una basetta supporto, di materiale isolante, delle dimensioni di 7 cm x 5 cm.

Il punto comune di R2 - R3 può essere filtrato a piacere con un condensatore ceramico verso massa, con grandezza compatibile con il prezzo ed il tempo di assestamento al momento dell'accensione.

Il condensatore C2 isola il carico, collegato sull'uscita U, dalla tensione continua corrispondente a quella del piedino 3, ovvero:

$$VCC : 2 = 4,5 \text{ V}$$

Facendo uso della doppia alimentazione e riferendo il piedino 3 a massa, il condensatore C2, quando il carico è anch'esso riferito a massa, non è più indispensabile.

### AMPLIFICATORE NON INVERTENTE

Lo schema di figura 3 propone il circuito di un amplificatore di segnali di bassa frequenza, che

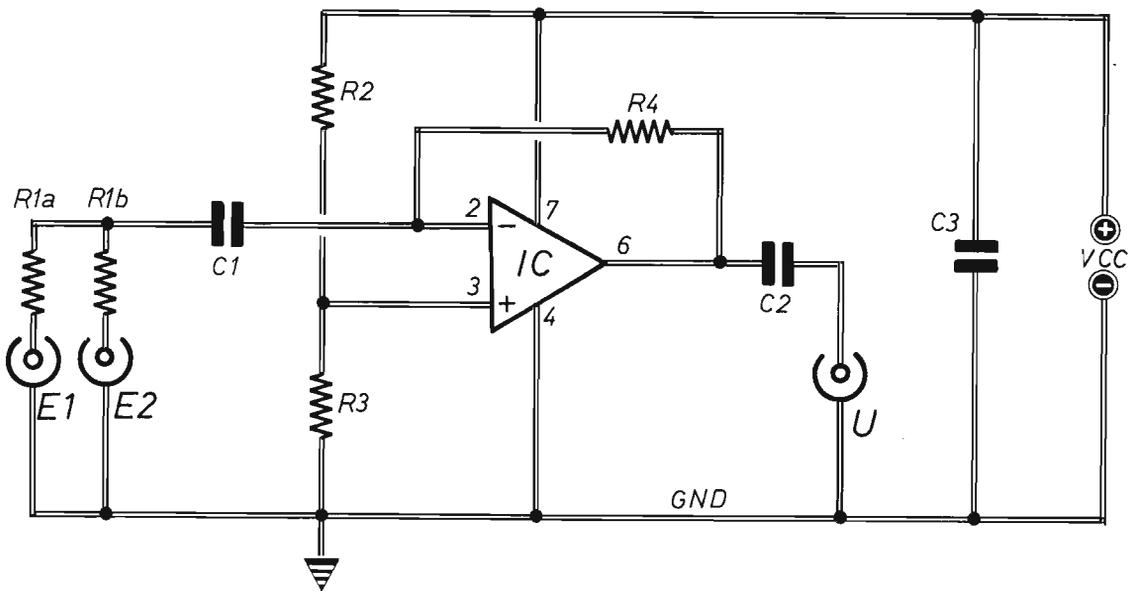


Fig. 8 - Esempio di circuito miscelatore a due ingressi, in grado di miscelare due diversi segnali di bassa frequenza e di proporre uno soltanto all'uscita U.

## COMPONENTI

### Condensatori

C1	=	1 $\mu$ F (non polarizzato)
C2	=	1 $\mu$ F (non polarizzato)
C3	=	100.000 pF

### Resistenze

R1a	=	22.000 ohm - 1/4 W
R1b	=	22.000 ohm - 1/4 W
R2	=	10.000 ohm - 1/4 W
R3	=	10.000 ohm - 1/4 W
R4	=	100.000 ohm - 1/4 W

### Varie

IC	=	$\mu$ A 741
VCC	=	9 Vcc

utilizza l'ingresso non invertente identificabile nel piedino 3 dell'integrato.

Il segnale alternato viene applicato all'entrata dell'operazionale tramite il condensatore C1. All'uscita, ossia sul piedino 6 del componente, dunque, il segnale appare amplificato ma in fase con quello d'ingresso, come dimostrato in figura 4.

La rete di controreazione per l'alternata, questa volta, agisce tra l'uscita dell'operazionale, il piedino 2 e massa, accoppiandosi tramite il condensatore C4, per il quale vale quanto detto in precedenza a proposito del condensatore C1 del progetto di figura 1.

Per estendere la frequenza verso il basso, oppure per diminuire gli effetti capacitivi di C1, le due resistenze R2 - R3 possono assumere valori ohmmici più elevati, ma uguali, anche dell'ordine del megaohm, se l'operazionale è dotato di un ingresso a FET.

Il guadagno, nel circuito di figura 3 è dato dall'espressione matematica:

$$G = R4 : R1$$

La costante di tempo, in questo secondo esempio di amplificatore di segnali alternati di bassa frequenza, è stabilita dal prodotto di C1 per il parallelo di R2 con R3.

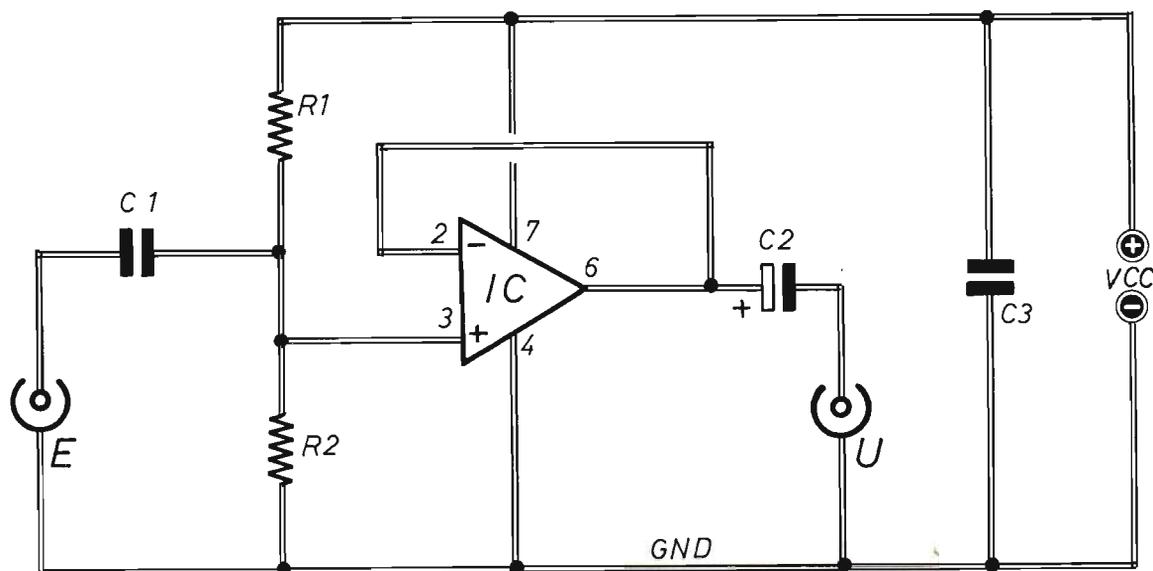


Fig. 9 - Cablaggio di un integrato operazionale in grado di opporre un'impedenza elevatissima ai segnali applicati all'ingresso E. Il guadagno, in questo dispositivo, si verifica in corrente, mentre quello in tensione è unitario.

## COMPONENTI

### Condensatori

C1	=	1 $\mu$ F (non polarizzato)
C2	=	10 $\mu$ F - 16 VI (elettrolitico)
C3	=	100.000 pF

### Resistenze

R1	=	22.000 ohm - 1/4 W
R2	=	22.000 ohm - 1/4 W

### Varie

IC	=	$\mu$ A 741
VCC	=	9 Vcc

### CIRCUITO SPERIMENTALE

Allo scopo di sperimentare praticamente una buona parte dei concetti fin qui menzionati, proponiamo, in figura 5, un semplice progetto di amplificatore con guadagno regolabile.

Il potenziometro R3 permette di controllare il guadagno del circuito tra il valore unitario e seicento volte, quando il segnale applicato in ingresso assume un valore di frequenza di 1.000 Hz.

Il calcolo teorico del guadagno si ottiene applicando il rapporto:

$$R3 : R_G$$

tenendo conto che R3 è una resistenza variabile fra zero ohm e 1 megaohm, perché rappresentata in pratica da un potenziometro, che consente di condurre gli esperimenti di amplificazione e che con la sigla R<sub>G</sub> si definisce la resistenza del generatore di tensione alternata identificabile, in tal caso, nell'altoparlante, utilizzato in funzione di microfono e dotato di impedenza di 8 ÷ 16 ohm.

Pertanto, applicando la formula precedentemente citata e ritenendo la resistenza del potenziometro R3 tutta inserita, si ha:

$$1.000.000 : 8 = 125.000$$

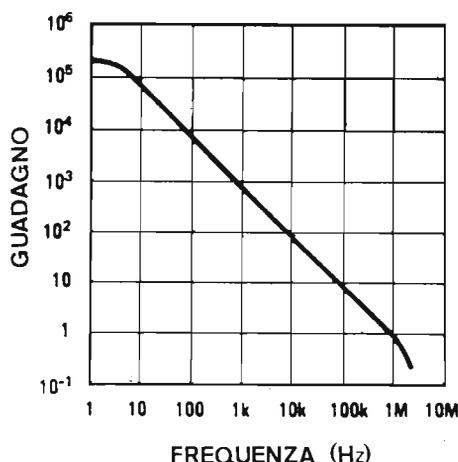


Fig. 10 - Diagramma indicativo delle variazioni di guadagno degli integrati operazionali in funzione di quelle di frequenza dei segnali ad essi applicati.

Ma questo è il valore teorico del guadagno, valutato matematicamente, mentre in realtà, qualora ci si servisse di un oscilloscopio, si potrebbe constatare che il guadagno, con tutta la resistenza R3 inserita nel circuito, ammonta a 600 volte. Infatti, come è già stato detto, gli operazionali amplificano sempre meno coll'aumentare della frequenza con cui lavorano e viceversa. In uno stesso circuito, quindi, l'integrato può guadagnare, ad esempio, 2.000 volte alla frequenza di 50 Hz e soltanto 500 volte a quella di 4.000 Hz. Ciò è pure rilevabile nel diagramma di figura 10, dove le variazioni del guadagno sono segnalate in funzione di quelle della frequenza di lavoro dell'operazionale. Naturalmente, questo fenomeno dipende dalle caratteristiche dinamiche del particolare integrato cui si fa riferimento. Perché attualmente i modelli più "lenti", disponibili sul mercato, sono quelli di tipo L 141, dotati di caratteristiche dinamiche del tipo sopra ricordato, mentre ne esistono altri, utilizzabili in applicazioni di alta frequenza, che sono dotati di un prodotto banda-guadagno anche mille volte superiore.

Il  $\mu A$  741 non costituisce l'integrato operazionale ideale per le amplificazioni di segnali alternati in bassa frequenza, ma per la realizzazione del progetto di figura 5 può bastare.

### MONTAGGIO SPERIMENTALE

La figura 6 propone lo schema realizzativo dell'esperimento descritto in precedenza e che

consiste nel manovrare il potenziometro R3 per valutare i diversi valori di guadagno raggiunti dall'operazionale IC.

Il montaggio va realizzato su una piastrina di materiale isolante delle dimensioni di 7 cm  $\times$  5 cm.

Il circuito stampato, il cui disegno in grandezza reale è pubblicato in figura 7, va composto su una delle due facce della piastrina supporto dove, contrariamente a quanto accade nella gran parte dei montaggi elettronici, si applicano tutti i componenti nel modo indicato in figura 6. Pertanto, gli elementi che concorrono alla formazione del circuito sperimentale, debbono essere montati direttamente sulle rispettive piste di rame e non sulla superficie opposta del supporto. Ma ciò appare chiaramente illustrato nel piano realizzativo dell'esperimento.

Per l'applicazione dell'integrato IC si consiglia di far uso di apposito zocchetto a otto piedini, ricordando che il terminale 1 si trova in prossimità degli elementi guida del componente.

L'altoparlante, che in questo circuito funge da microfono, grazie alla sua reversibilità funzionale, può avere un'impedenza di valore compreso fra gli 8 ohm e i 16 ohm, mentre la cuffia, che consente l'ascolto dei suoni amplificati, può essere scelta fra i modelli con impedenza di 50  $\div$  600 ohm.

Per garantire il funzionamento del dispositivo e allo scopo di semplificare la composizione del circuito stampato, si è provveduto all'inserimento di un ponticello, visibile in posizione centra-

le, in basso dello schema di figura 6. È ovvio quindi che, non inserendo questo spezzone di filo conduttore, l'amplificatore non funziona.

Il potenziometro, con il quale si fa variare il guadagno dell'amplificatore, è di tipo a variazione lineare.

## APPLICAZIONI VARIE

Mentre il progetto di figura 5 è rappresentativo di un amplificatore di bassa frequenza in alternata, nel quale l'operazionale IC lavora in processi di amplificazione elevata, quelli riportati nelle figure 8 e 9 costituiscono due specifiche applicazioni dell'operazionale  $\mu A$  741. Più esattamente, il progetto di figura 8 identifica il circuito di un dispositivo miscelatore di bassa fre-

quenza, mentre quello di figura 9 si riferisce al tipico cablaggio di un operazionale con elevatissima impedenza d'entrata.

Nello schema di figura 8, ossia del mixer BF, sono presenti due entrate, E1 - E2, sulle quali si applicano due segnali provenienti da altrettante sorgenti diverse.

Sull'uscita 6 dell'integrato IC i due segnali vengono proposti miscelati in un unico segnale disponibile in U. Naturalmente, anche per questo circuito valgono tutti i concetti teorici precedentemente menzionati ed analizzati.

Il progetto di figura 9 interpreta il sistema di cablaggio dell'integrato operazionale IC che, nell'ingresso E, oppone alla sorgente di segnale un'impedenza elevatissima. In tale circostanza, quindi, il guadagno di tensione circuitale è unitario, mentre quello in corrente è sensibile.

# Raccolta PRIMI PASSI - L. 19.000

Nove fascicoli arretrati di maggiore rilevanza didattica per il principiante elettronico.

Le copie sono state attentamente selezionate fra quelle la cui rubrica "PRIMI PASSI" ha riscosso il massimo successo editoriale con i seguenti argomenti:

- 1° - Bobine e induttanze
- 2° - Circuiti L-C oscillatori
- 3° - Tutta la radio dall'entrata all'uscita
- 4° - Condensatori teoria misure
- 5° - Collegamenti e controlli capacitivi
- 6° - Tensioni alternate efficaci
- 7° - Trasformatori collegamenti misure
- 8° - Transistor generalità prove pratiche
- 9° - Transistor amplificazione segnali BF



Ogni richiesta della RACCOLTA PRIMI PASSI deve essere fatta inviando anticipatamente l'importo di L. 19.000 (nel prezzo sono comprese le spese di spedizione) a mezzo vaglia, assegno o conto corrente postale N. 916205 e indirizzando a: ELETTRONICA PRATICA - 20125 MILANO - Via Zuretti, 52.