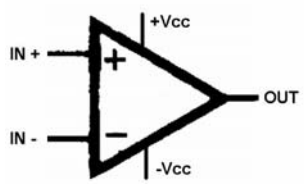
L'amplificatore operazionale semplificato, a cura di Emilio Ciardiello

L'amplificatore operazionale è tipicamente una struttura di guadagno provvista di due ingressi differenziali, uno non invertente ed uno invertente, ed una uscita.



L'alimentazione prevede due soli piedini, che possono essere connessi ad un alimentatore bipolare, ad esempio ±15 Volt, o anche ad un alimentatore unipolare, ad esempio +5V. Non vi è alcun piedino di massa, ovvero alcun piedino collegato allo zero o al punto centrale dell'alimentatore. Ed allora come faccio a collegare una sorgente di segnale all'ingresso? Ed ancora, quale tensione mi troverò in uscita in assenza di segnale?

Incominciamo con l'osservare che per molti operazionali è specificato un ampio campo di tensioni di alimentazione. A titolo di esempio, per l'OP07 l'alimentazione può variare tra ±3V e ±22V, mentre per l'LM324 la tensione può essere singola, compresa tra 3V e 32V, oppure duale, compresa tra ±1.5V e ±16V. Per l'OP07 gli ingressi possono operare entro ±14V, mentre l'LM324 può accettare in ingresso da -1.5V a 32V, quando alimentato a 32V. Nulla vieta di usare tensioni intermedie ed anche alimentazioni duali asimmetriche, ad esempio +5V e -12V, ove richiesto per interfacciarsi a circuiti esterni. Nulla vieta di alimentare l'OP07 con una tensione unipolare, ad esempio +12V, salvo creare un riferimento intermedio intorno al quale si muoveranno ingressi ed uscita. Il guadagno in tensione dell'amplificatore è molto elevato, nell'ordine di diecine o centinaia di volt in uscita per millivolt di ingresso. La variazione di tensione in uscita, 'output swing', copre tutto il range di alimentazione, a meno delle modeste cadute sulle giunzioni dello stadio finale.

L'operazionale, per le caratteristiche di guadagno elevato in assenza di controreazione e la conseguente rapida variazione dell'uscita, può essere usato come comparatore. Se la tensione applicata all'ingresso non invertente è anche di poco più alta di quella all'ingresso invertente, l'uscita si porterà, a meno delle cadute interne nello stadio di uscita dell'amplificatore, al valore di +Vcc. Se invece la tensione sull'ingresso invertente supera quella sull'altro ingresso, l'uscita si porterà al valore di -Vcc. Se proviamo a realizzare un comparatore simile ci accorgiamo che esiste una fascia di indeterminazione, quella corrispondente a valori sui due ingressi molto prossimi, nella quale il circuito si comporta in maniera lineare, con tensione di uscita intermedia tra le due alimentazioni, e potrà anche oscillare. In ogni caso, essendo gli ingressi differenziali, il comparatore funzionerà per qualunque coppia di tensioni in ingresso, purchè nel range di funzionamento specificato.

Op-amp come comparatore, alimentato a ±12 volt			
Non inverting input volt	**Inverting input volt**	**Output volt approx**	**Note**
-9.0	**-9.5**	**+11**	**Entrambi gli ingressi negativi, In+ > In-**
+0.5	**-0.5**	**+11**	**In+ positivo > In- negativo**
+8.0	**+7.5**	**+11**	**Entrambi gli ingressi positivi, In+ > In-**
-7.5	**-7.0**	**-11**	**Entrambi gli ingressi negativi, In+ < In-**
-0.8	**+0.8**	**-11**	**In+ negativo < In- positivo**
+6.0	**+6.5**	**-11**	**Entrambi gli ingressi positivi, In+ < In-**

Un comparatore di tensione simile, per l'alto guadagno tipico di un operazionale, avrà una altissima sensibilità e sarà quindi in grado di comparare tensioni che differiscono di millivolt o frazioni di millivolt. Occorrerà però inserire una qualche forma di reazione positiva e prevedere una sia pur bassa isteresi, per prevenire stati indeterminati quando le due tensioni in ingresso sono prossime tra loro ed anche oscillazioni in presenza di rumore.

Le osservazioni fatte circa l'operazionale usato come comparatore ed in assenza di controreazione consentono di comprendere più facilmente come l'uscita non dipenda dal valore assoluto dei due ingressi ma dal loro valore relativo, ovvero dalla differenza di tensione tra di essi. Il segnale di uscita è libero di muoversi tra le due alimentazioni, negativa e positiva. Fin qui non si vede necessità di un punto comune di massa, se non per interfacciare le sorgenti e uscita. Infatti in generale i segnali in ingresso possono non essere differenziali, ma essere riferiti ad una massa comune e soprattutto il nostro circuito dovrà essere usato come amplificatore lineare, ovvero in una fascia nella quale il segnale in uscita sia proporzionale alla differenza di segnale sugli ingressi. Si tenga presente che il guadagno open-loop tipico di un comune 741 è maggiore di 50V/mV e dunque basterebbe un segnale di frazioni di millivolt per portare lo stadio di uscita in saturazione, a valori positivi o negativi comunque prossimi a quelli di alimentazione. Abbiamo dunque bisogno di introdurre una controreazione. Vediamo i due tipici circuiti:

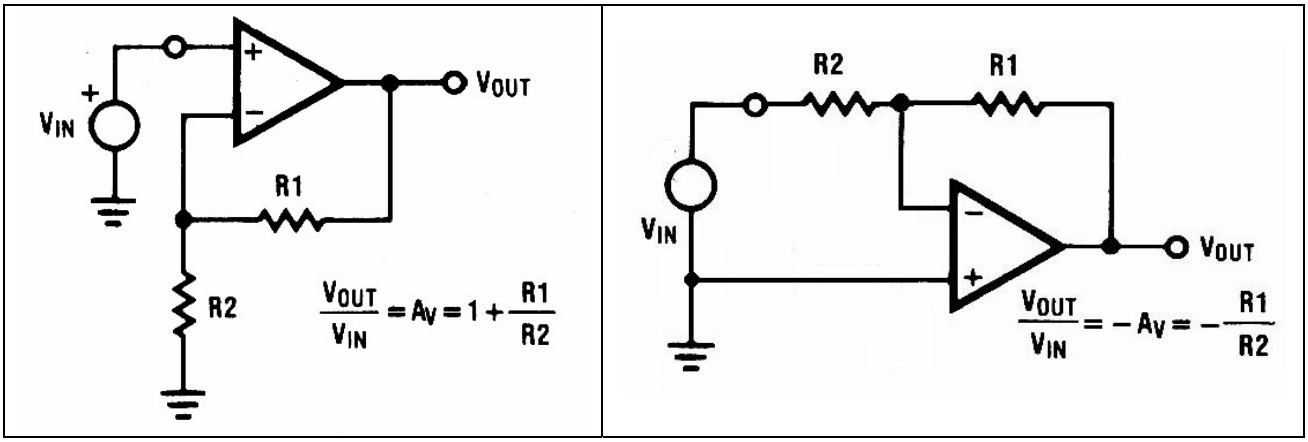
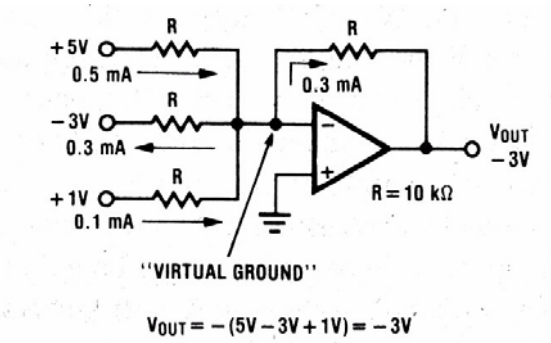


Fig. 1 - A sinistra schema di amplificatore non invertente, a destra amplificatore invertente.

Nel primo circuito il segnale è applicato all'ingresso non invertente e sull'ingresso invertente viene riportato un segnale pari a quello in uscita, attenuato del rapporto R1/R2. Nel secondo circuito il segnale Vin è applicato all'ingresso invertente e si sommerà algebricamente alla tensione di feedback, di modo da avere sempre su tale ingresso il potenziale di massa presente sull'ingresso non invertente. In altri termini, il nodo fra R2 ed R1 costituisce una massa virtuale, che può essere utilizzata per sommare più segnali tra di loro, come nel circuito seguente.



Prima di passare ad altri circuiti applicativi, conviene osservare che gli amplificatori operazionali sono o almeno erano prodotti in una varietà di modelli, caratterizzati da tecnologie differenti,

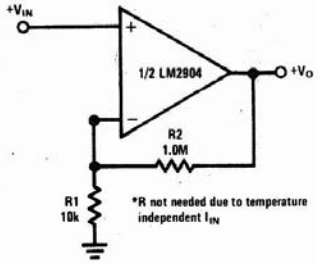
prestazioni più o meno elevate ed anche da parametri parassiti e da derive termiche notevolmente variabili. Nel circuito rappresentato sopra il piedino di ingresso non invertente è connesso direttamente a massa. In realtà, nei transistori bipolari di ingresso circola comunque una corrente, la Ibias, molto variabile con la temperatura. Per prevenire uno sbilanciamento dovuti alla Ibias che circola nella resistenza equivalente presente sul piedino invertente si usa inserire un resistore di valore prossimo ad essa anche fra l'ingresso non invertente e massa. Per inciso, la massa coincide generalmente con il punto centrale di un'alimentazione bipolare, ad esempio ±5V, ±12V o ±15V ma, se l'applicazione lo richiede, essa può essere collegata ad un qualsiasi riferimento intermedio, facendo uso di un partitore resistivo o meglio di un diodo zener o di un regolatore di tensione.

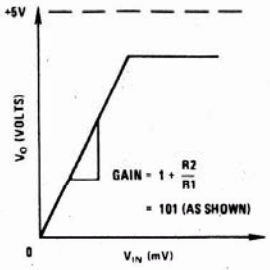
Ci sono altri parametri da considerare quando si utilizza un operazionale in applicazioni spinte. Quando si lavora con segnali deboli è importante valutare la tensione di offset, ovvero la tensione che sarebbe necessario applicare agli ingressi per avere una tensione nulla in uscita in assenza di segnale. Uno sbilanciamento dovuto alla tensione di offset in ingresso può essere compensato sommando una piccola tensione di correzione all'ingresso, occorre però tener presente che l'offset può variare moltissimo con la temperatura.

Di seguito sono riportati alcuni esempi di utilizzo di amplificatori operazionali ed una sintesi delle caratteristiche di alcuni operazionali.

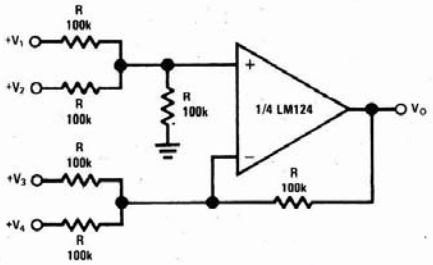
typical single-supply applications ($V^+ = 5.0\ V_{DC}$)

Non-Inverting DC Gain (0V Input = 0V Output)



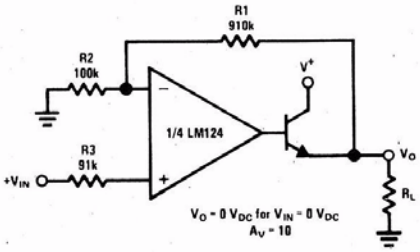


DC Summing Amplifier
($V_{IN'S} \geq 0\ V_{DC}$ AND $V_O \geq 0\ V_{DC}$)



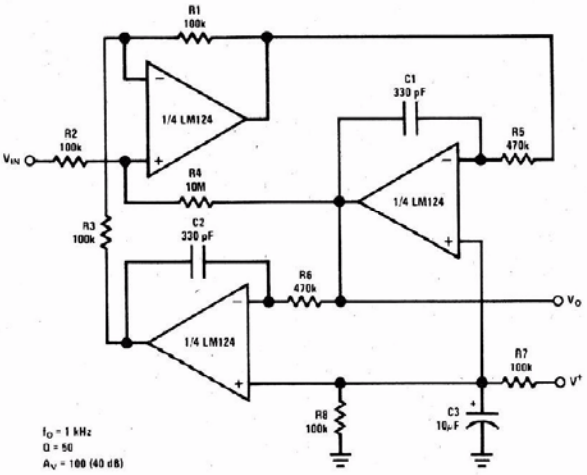
Where: $V_O = V_1 + V_2 \quad V_3 \quad V_4$
$(V_1 + V_2) \geq (V_3 + V_4)$ to keep $V_O > 0\ V_{DC}$

Power Amplifier



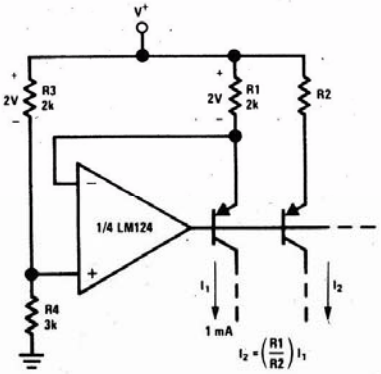
$V_O = 0\ V_{DC}$ for $V_{IN} = 0\ V_{DC}$
$A_V = 10$

"BI-QUAD" RC Active Bandpass Filter



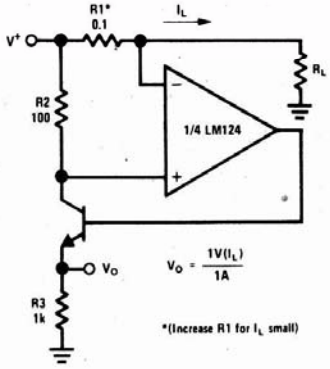
$f_O = 1$ kHz
$Q = 50$
$A_V = 100$ (40 dB)

Fixed Current Sources



$I_2 = \left(\frac{R1}{R2}\right) I_1$

Current Monitor

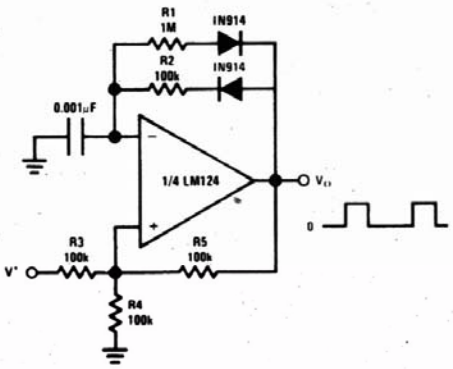


$V_O = \frac{1V(I_L)}{1A}$

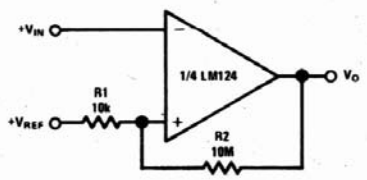
*(Increase R1 for I_L small)

typical single-supply applications (con't) ($V^+ = 5.0\ V_{DC}$)

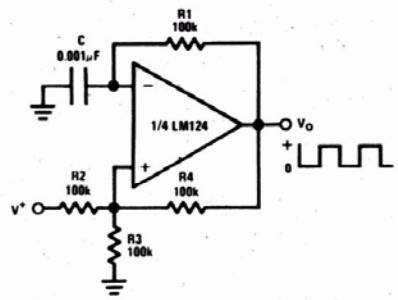
Pulse Generator



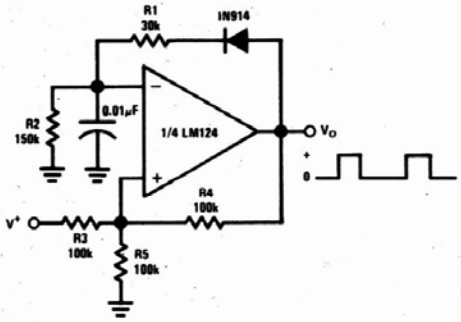
Comparator with Hysteresis



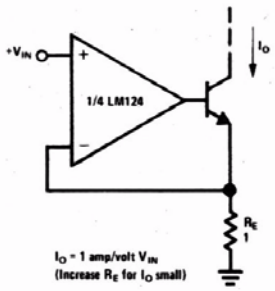
Squarewave Oscillator



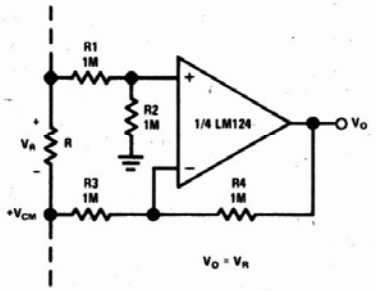
Pulse Generator



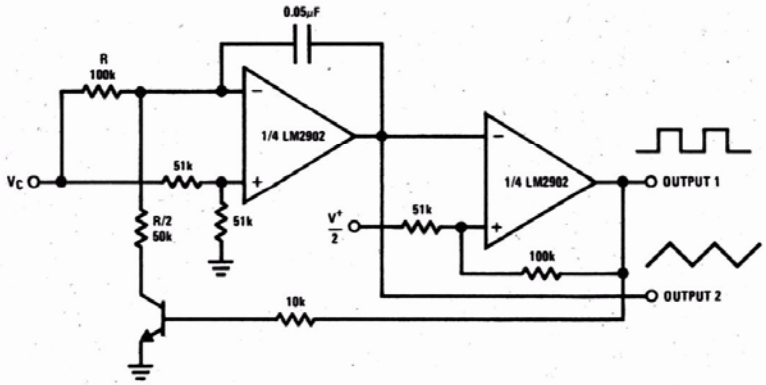
High Compliance Current Sink



Ground Referencing A Differential Input Signal

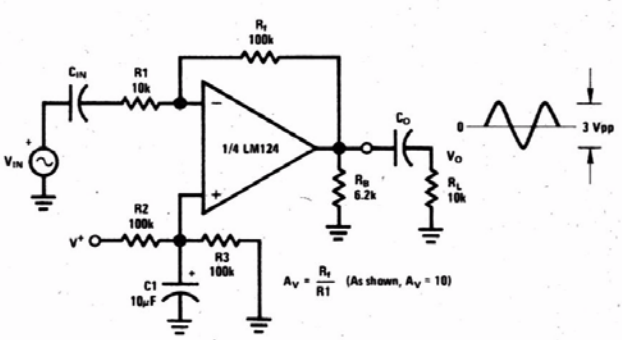


Voltage Controlled Oscillator Circuit

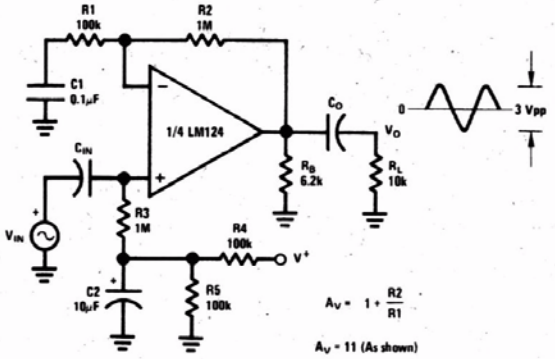


typical single-supply applications (con't) ($V^+ = 5.0\ V_{DC}$)

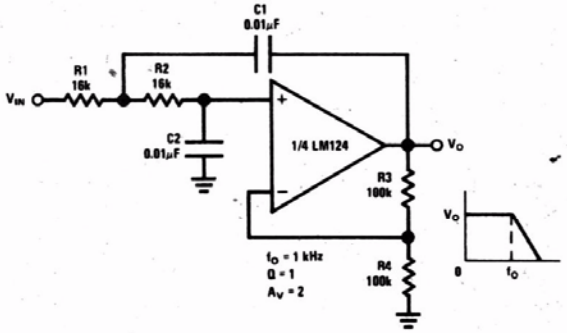
AC Coupled Inverting Amplifier



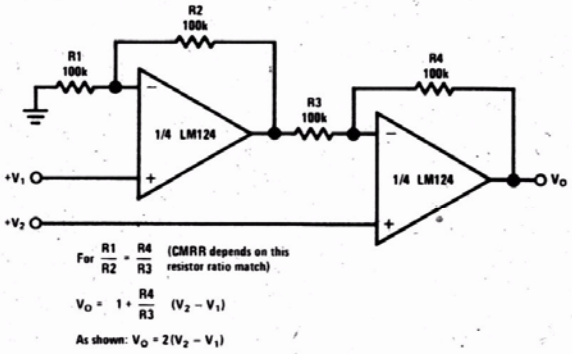
AC Coupled Non-Inverting Amplifier



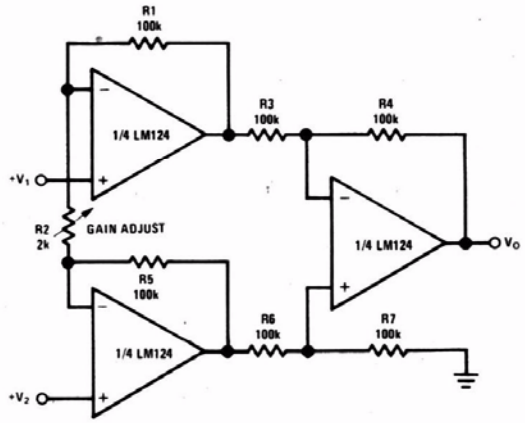
DC Coupled Low-Pass RC Active Filter



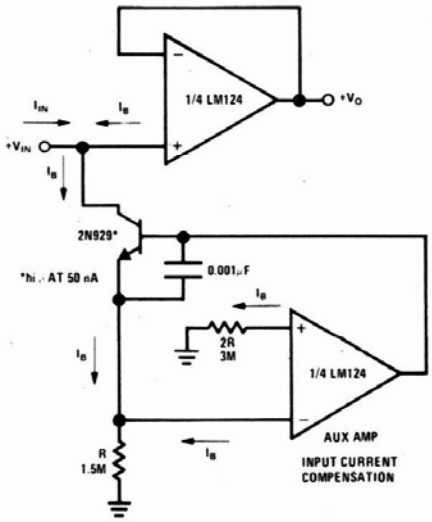
High Input Z, DC Differential Amplifier



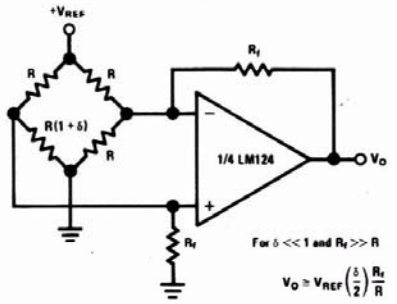
High Input Z Adjustable-Gain DC Instrumentation Amplifier



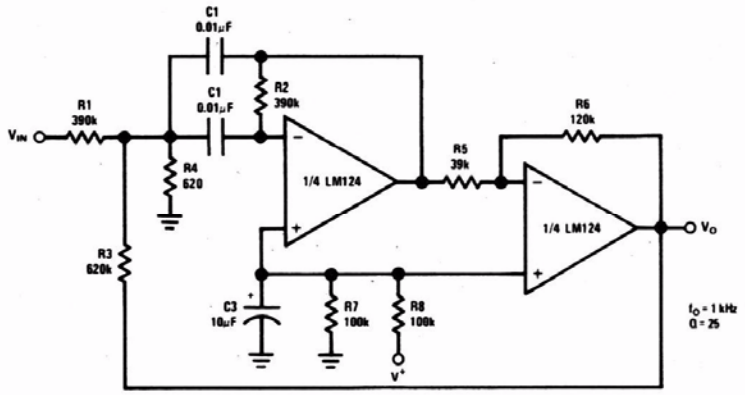
Using Symmetrical Amplifiers to Reduce Input Current (General Concept)



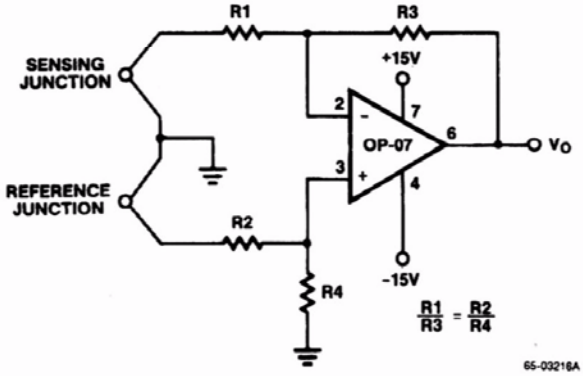
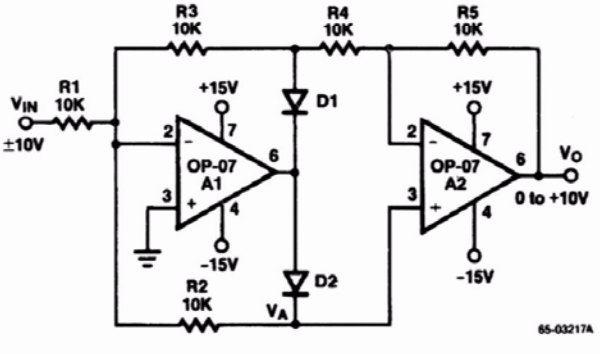
Bridge Current Amplifier



Bandpass Active Filter



High Stability Thermocouple Amplifier*



Precision Absolute Value Circuit*