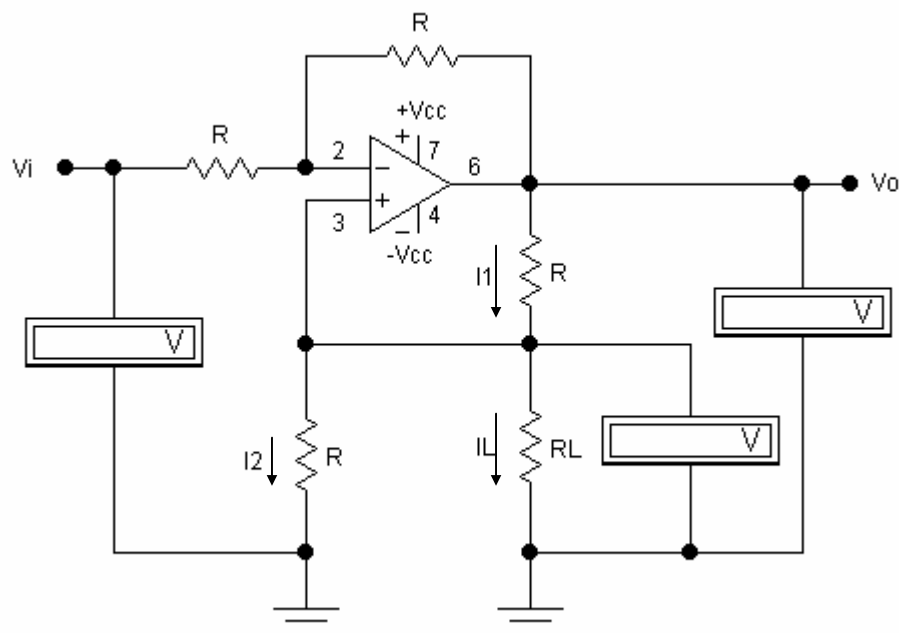


**PROGETTO E VERIFICA DI UN CONVERTITORE V/I CONN AMPLIFICATORE
OPERAZIONALE CON CARICO COLLEGATO A MASSA INVERTENTE, NON
INVERTENTE, DIFFERENZIALE.**

CONFIGURAZIONE INVERTENTE



Richiami teorici

$$I_L = I_1 - I_2 = \frac{V_o - V_+}{R} - \frac{V_+}{R} = \frac{V_o - 2V_+}{R}$$

$$V_+ = V_- = \frac{R}{R+R} V_i + \frac{R}{R+R} V_o = \frac{V_i}{2} + \frac{V_o}{2} \Rightarrow V_o = 2V_- - V_i = 2V_+ - V_i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_L = \frac{2V_+ - V_i - 2V_+}{R} = -\frac{V_i}{R}$$

Valori limite per V_i e R_L

Il circuito funzionerà in modo lineare, ossia $I_L = -\frac{V_i}{R}$, fintanto che l'uscita non satura. La tensione d'uscita V_o dipende da V_i , R_L ed R . Dall'equipotenzialità degli ingressi, si ha:

$$V_+ = V_- = \frac{R // R_L}{R + R // R_L} V_o = \frac{V_o + V_i}{2} \Rightarrow V_o \left(1 - \frac{2R // R_L}{R + R // R_L} \right) = -V_i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_o \frac{R - R // R_L}{R + R // R_L} = -V_i \Rightarrow V_o = -\frac{R + R // R_L}{R - R // R_L} V_i = -\frac{R^2 + 2RR_L}{R^2} V_i = -\frac{R + 2R_L}{R} V_i$$

$$\text{Se } R_L \ll R \Rightarrow V_o = -\frac{R + 2R_L}{R} V_i \cong -V_i$$

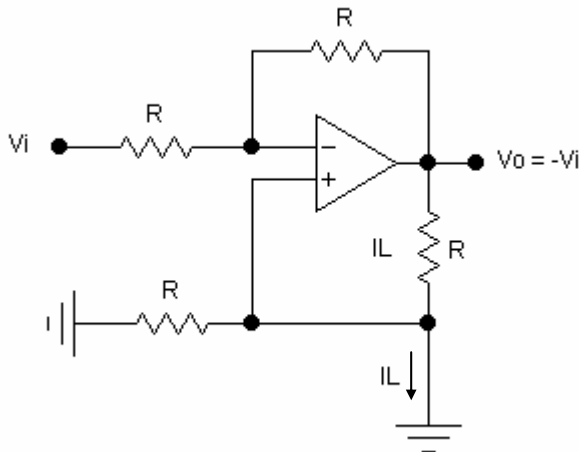
- a. Fissati i valori di R ed R_L (con $R_L \ll R$) e le tensioni di saturazione $V_{oH} = V_{oL} = V_{CC} - 2V$, si calcolano i valori minimo e massimo di V_i per i quali il comportamento del circuito è lineare:

$$- \text{ se } V_o = V_{oH} \Rightarrow V_i = V_{iMIN} = -\frac{R}{R + 2R_L} V_{oH} \cong -V_{oH}$$

$$- \text{ se } V_o = V_{oL} \Rightarrow V_i = V_{iMAX} = -\frac{R}{R + 2R_L} V_{oL} \cong -V_{oL} = V_{oH}$$

- b. Fissati i valori di R e V_i , si ha:

$$- \text{ se } R_L = 0 \Rightarrow V_i = V_{iMIN} = -\frac{R}{R + 2R_L} V_{oH} \cong -V_{oH}$$



Il circuito si comporta da invertitore,

$$\text{con corrente } I_L = -\frac{V_i}{R}.$$

- se R_L cresce $\Rightarrow$ aumenta anche V_o . Si calcola, pertanto, R_L in funzione di V_i , V_o e R :

$$V_o = -\frac{R + 2R_L}{R} V_i \Rightarrow RV_o = -RV_i - 2R_L V_i \Rightarrow 2R_L V_i = -R(V_o + V_i) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_L = -\frac{V_o + V_i}{2V_i} R \Rightarrow R_{LMAX} = -\frac{-V_{oH} + V_i}{2V_i} R$$

- Se si varia V_i , tenendo costante R_L , la corrente I_L nel carico R_L dipenderà solo dalla tensione d'ingresso se V_i varia tra V_{iMIN} e V_{iMAX} .
- Se si varia R_L , tenendo costante V_i , la corrente I_L si mantiene costante $\left(I_L = -\frac{V_i}{R} \right)$, purché il valore di R_L non superi il valore R_{LMAX} .

Dimensionamento del circuito e definizione delle misure

Si usa l'amplificatore operazionale TL081 e si fissa $R = 33\text{k}\Omega$ e $V_{CC} = \pm 12\text{V}$; $V_{oH} = -V_{oL} = 10\text{V}$.

- a. Si mantiene fisso il valore di $R_L = 1\text{k}\Omega$ ($R_L \ll R$) e si varia V_i . Si misura V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$. I valori limite per V_i sono:

$$V_{iMAX} = -V_{iMIN} = -\frac{R}{R + 2R_L} V_{oL} = \frac{33 \cdot 10^3}{33 \cdot 10^3 + 2 \cdot 1 \cdot 10^3} \cdot 10 = 9,43\text{V}$$

Si farà variare V_i tra -12V e $+12\text{V}$.

- b. Si mantiene fisso il valore di $V_i = 5\text{V}$ e si varia R_L . Si misura V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$. Il valore limite per R_L è:

$$\begin{aligned} V_i > 0 &\Rightarrow V_o < 0 \Rightarrow V_o = V_{oL} = -V_{oH} \text{ quando } R_L = R_{LMAX} \Rightarrow \\ \Rightarrow R_{LMAX} &= -\frac{-V_{oH} + V_i}{2V_i} R = -\frac{-10 + 5}{2 \cdot 5} \cdot 33 \cdot 10^3 = 16,5\text{k}\Omega \end{aligned}$$

Si farà variare R_L tra $1\text{k}\Omega$ e $33\text{k}\Omega$.

Si misura, in entrambi i casi, la tensione d'uscita V_o .

Strumenti e apparecchiature

Alimentatore stabilizzato duale $\pm 12\text{V}$; alimentatore stabilizzato variabile $0 \div 20\text{V}$; multimetro digitale 4½ digit come voltmetro; basetta di bread-board.

Componenti attivi e passivi necessari

Resistenze: 4x33kΩ ; 1x1kΩ ; 1x2,2kΩ ; 1x3,3kΩ ; 1x4,7kΩ ; 1x8,2kΩ ; 1x10kΩ ; 1x12kΩ ; 1x15kΩ ; 1x33kΩ.

Circuiti integrati: 1xTL081

Procedimento di verifica

1. Montato e alimentato il circuito, si collega all'ingresso l'alimentatore variabile col morsetto rosso (il +) collegato a massa e il morsetto nero (il -) collegato alla resistenza d'ingresso R , in modo da ottenere tensioni d'ingresso negative.
2. Si collega all'ingresso il voltmetro e si regola l'alimentatore variabile a -12V .
3. Si misurano V_o e V_L e, con i valori misurati, si calcola I_L come rapporto $\frac{V_L}{R_L}$.
4. Si ripetono i punti 2 e 3 per le tensioni d'ingresso -10V ; -8V ; -6V ; -4V ; -2V ; -1V .
5. Si invertono i morsetti dell'alimentatore variabile, rosso (il +) alla resistenza R d'ingresso e nero (il -) a massa, per ottenere tensioni d'ingresso positive.

6. Si ripetono i punti 2 e 3 per le tensioni d'ingresso 1V ; 2V ; 4V ; 6V ; 8V ; 10V ; 12V.
7. Si riportano i valori misurati in una tabella in cui compaiono i valori teorici di V_o e I_L , per un immediato confronto e verifica del funzionamento.
8. Si regola la tensione d'ingresso a 5V e si misurano V_o e V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$.
9. Si inserisce una resistenza R_L di 2,2k Ω , si misurano V_o e V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$.
10. Si ripete il punto 9 per i valori di R_L di 3,3k Ω ; 4,7k Ω ; 8,2k Ω ; 10k Ω ; 12k Ω ; 15k Ω ; 33k Ω .
11. Si riportano i valori misurati in una tabella in cui compaiono i valori teorici di V_o e I_L , per un immediato confronto e verifica del funzionamento.
12. Si traggono le conclusioni

Tabulazione dei dati

TABELLA I - VARIA LA TENSIONE D'INGRESSO V_i						
k Ω	Valori misurati				Val. calcolati	
	Volt			μA	Volt	μA
R_L	V_i	V_o	V_L	I_L	V_o	I_L
1	-12	10,982	0,374	374	11,32	364
1	-10	10,54	0,302	302	10,6	303
1	-8	8,493	0,241	241	8,48	242
1	-6	6,327	0,181	181	6,36	182
1	-4	4,215	0,120	120	4,24	121
1	-2	2,107	0,060	60	2,12	60,6
1	-1	1,049	0,030	30	1,06	30,3
1	1	-1,052	-0,030	-30	-1,06	-30,3
1	2	-2,113	-0,060	-60	-2,12	-60,6
1	4	-4,218	-0,121	-121	-4,24	-121
1	6	-6,630	-0,181	-181	-6,36	-182
1	8	-8,499	-0,242	-242	-8,48	-242
1	10	-10,35	-0,296	-296	-10,6	-303
1	12	-10,38	-0,297	-297	-11,32	-364

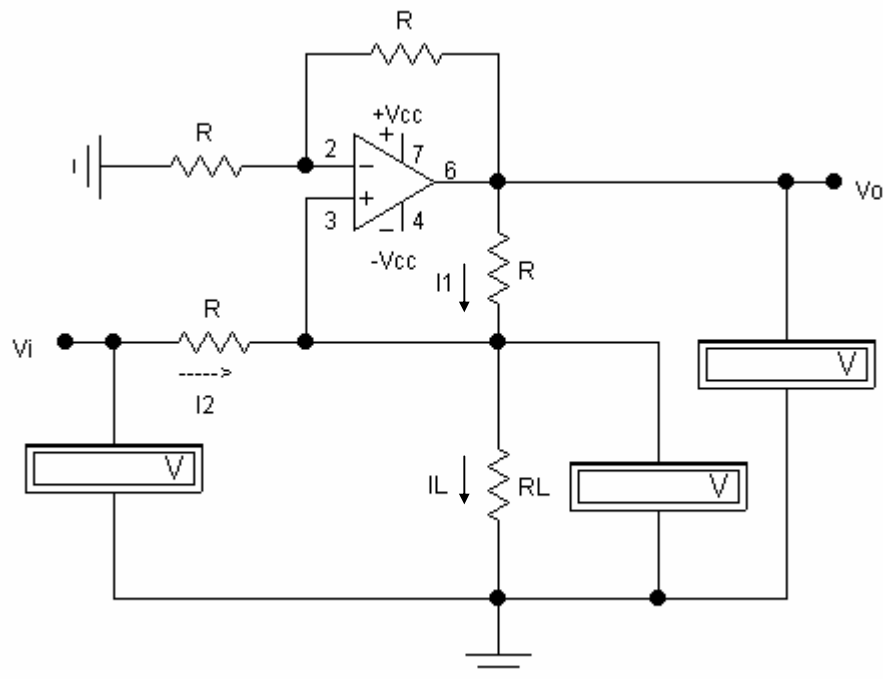
TABELLA II - VARIA LA RESISTENZA DI CARICO R_L						
k Ω	Valori misurati				Val. calcolati	
	Volt			μA	Volt	μA
R_L	V_i	V_o	V_L	I_L	V_o	I_L
1	5	-5,224	-0,151	-151	-5,30	-151
2,2	5	-5,635	-0,151	-151	-5,67	-151
3,3	5	-5,963	-0,150	-150	-6,00	-151
4,7	5	-6,382	-0,150	-150	-6,42	-151
8,2	5	-7,458	-0,151	-151	-7,48	-151
10	5	-7,970	-0,150	-150	-8,03	-151
12	5	-8,591	-0,151	-151	-8,64	-151
15	5	-9,495	-0,151	-151	-9,54	-151
33	5	-10,478	-0,104	-104	-15	-151

Conclusioni

Tabella I: dal confronto tra i valori di I_L misurati e quelli calcolati, risulta un ottimo accordo, salvo quando la tensione d'uscita si avvicina alle tensioni di saturazione. La cosa è particolarmente evidente per la saturazione negativa.

Tabella II: dal confronto tra i valori di I_L misurati e quelli calcolati, si evidenzia la perdita della dipendenza della corrente I_L da V_i allorché il valore della resistenza R_L di carico supera il valore massimo di $16,5k\Omega$.

CONFIGURAZIONE NON INVERTENTE



Richiami teorici

$$I_L = I_1 + I_2 = \frac{V_o - V_+}{R} + \frac{V_i - V_+}{R} = \frac{V_o + V_i - 2V_+}{R}$$

$$V_+ = V_- = \frac{R}{R + R} V_o = \frac{V_o}{2} \Rightarrow V_o = 2V_+ \Rightarrow I_L = \frac{2V_+ + V_i - 2V_+}{R} = \frac{V_i}{R}$$

La corrente nel carico, una volta fissato il valore di R , dipende solo dalla tensione d'ingresso V_i .

Valori limite per V_i e R_L

Il circuito funziona in modo lineare, ossia $I_L = -\frac{V_o}{R}$, fintanto che l'uscita non satura. La tensione d'uscita V_o dipende da V_i , R_L ed R . Dall'equipotenzialità degli ingressi, si ha:

$$V_+ = V_- \Rightarrow \frac{R // R_L}{R + R // R_L} V_i + \frac{R // R_L}{R + R // R_L} V_o = \frac{R}{R + R} V_o = \frac{V_o}{2} \Rightarrow$$

$$V_o \left(1 - \frac{2R // R_L}{R + R // R_L} \right) = \frac{R // R_L}{R + R // R_L} V_i \Rightarrow V_o \frac{R - R // R_L}{R + R // R_L} = \frac{R // R_L}{R + R // R_L} V_i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_o = \frac{2R // R_L}{R - R // R_L} V_i = \frac{\frac{2RR_L}{R + R_L}}{R - \frac{2RR_L}{R + R_L}} V_i = \frac{2RR_L}{R^2 + RR_L - RR_L} V_i = \frac{2RR_L}{R^2} V_i = \frac{2R_L}{R} V_i$$

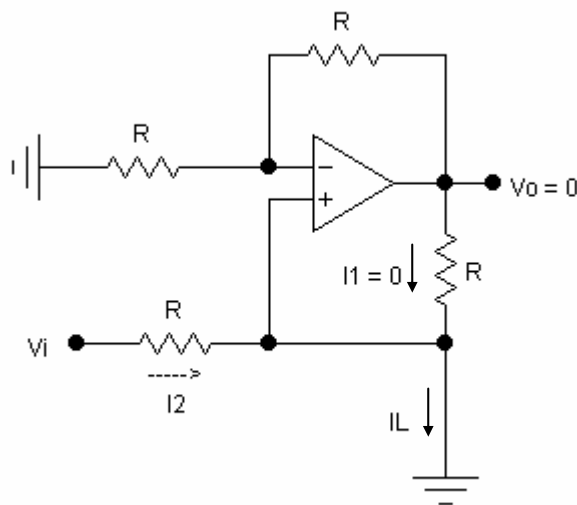
a. Fissati i valori di R ed R_L (con $R_L \ll R$) e le tensioni di saturazione $V_{oH} = V_{oL} = V_{CC} - 2V$, si calcolano i valori minimo e massimo di V_i per i quali il comportamento del circuito è lineare:

$$- \text{ se } V_o = V_{oL} \Rightarrow V_i = V_{iMIN} = \frac{R}{2R_L} V_{oL} = -\frac{R}{2R_L} V_{oH}$$

$$- \text{ se } V_o = V_{oH} \Rightarrow V_i = V_{iMAX} = \frac{R}{2R_L} V_{oH}$$

b. Fissati i valori di R e V_i , si ha:

$$- \text{ se } R_L = 0 \Rightarrow V_o = 0 \Rightarrow I_L = \frac{V_i}{R}$$



- se R_L cresce $\Rightarrow$ aumenta anche V_o . Si calcola, pertanto, R_L in funzione di V_i , V_o e R :

$$R_L = \frac{V_o}{2V_i} R \Rightarrow R_{LMAX} = \frac{V_{oH}}{2V_i} R$$

- Se si varia V_i , tenendo costante R_L , la corrente I_L nel carico R_L dipenderà solo dalla tensione d'ingresso se V_i varia tra V_{iMIN} e V_{iMAX} .
- Se si varia R_L , tenendo costante V_i , la corrente I_L si mantiene costante $\left(I_L = \frac{V_i}{R}\right)$, purché il valore di R_L non superi il valore R_{LMAX} .

Dimensionamento del circuito e definizione delle misure

Si usa l'amplificatore operazionale TL081 e si fissa $R = 33k\Omega$ e $V_{CC} = \pm 12V$; $V_{oH} = -V_{oL} = 10V$.

- Si mantiene fisso il valore di $R_L = 1k\Omega$ ($R_L \ll R$) e si varia V_i . Si misurano V_o e V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$. I valori limite per V_i sono:

$$V_{iMAX} = -V_{iMIN} = \frac{R}{2R_L} V_{oH} = \frac{33 \cdot 10^3}{2 \cdot 1 \cdot 10^3} \cdot 10 = 165V$$

Si farà variare V_i tra $-12V$ e $+12V$. Per tali valori di V_i non si perderà la linearità del circuito.

- Si mantiene fisso il valore di $V_i = 5V$ e si varia R_L . Si misurano V_o e V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$. Il valore limite per R_L è:

$$V_i > 0 \Rightarrow V_o > 0 \Rightarrow V_o = V_{oL} = -V_{oH} \text{ quando } R_L = R_{LMAX} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_{LMAX} = \frac{V_{oH}}{2V_i} R = \frac{10}{2 \cdot 5} \cdot 33 \cdot 10^3 = 33k\Omega$$

Si farà variare R_L tra $1k\Omega$ e $56k\Omega$.

Si misura, in entrambi i casi, la tensione d'uscita V_o .

Strumenti e apparecchiature

Alimentatore stabilizzato duale $\pm 12V$; alimentatore stabilizzato variabile $0 \div 20V$; multimetro digitale 4½ digit come voltmetro; basetta di bread-board.

Componenti attivi e passivi necessari

Resistenze: 4x33k Ω ; 1x1k Ω ; 1x3,3k Ω ; 1x4,7k Ω ; 1x8,2k Ω ; 1x10k Ω ; 1x15k Ω ; 1x22k Ω ; 1x27k Ω ; 1x33k Ω ; 1x47k Ω ; 1x56k Ω .

Circuiti integrati: 1xTL081

Procedimento di verifica

1. Montato e alimentato il circuito, si collega all'ingresso l'alimentatore variabile col morsetto rosso (il +) collegato a massa e il morsetto nero (il -) collegato alla resistenza d'ingresso R , in modo da ottenere tensioni d'ingresso negative.
2. Si collega all'ingresso il voltmetro e si regola l'alimentatore variabile a -12V.
3. Si misurano V_o e V_L e, con i valori misurati, si calcola I_L come rapporto $\frac{V_L}{R_L}$.
4. Si ripetono i punti 2 e 3 per le tensioni d'ingresso -10V ; -8V ; -6V ; -4V ; -2V ; -1V.
5. Si invertono i morsetti dell'alimentatore variabile, rosso (il +) alla resistenza R d'ingresso e nero (il -) a massa, per ottenere tensioni d'ingresso positive.
6. Si ripetono i punti 2 e 3 per le tensioni d'ingresso 1V ; 2V ; 4V ; 6V ; 8V ; 10V ; 12V.
7. Si riportano i valori misurati in una tabella in cui compaiono i valori teorici di V_o e I_L , per un immediato confronto e verifica del funzionamento.
8. Si regola la tensione d'ingresso a 5V e si misurano V_o e V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$.
9. Si inserisce una resistenza R_L di 2,2k Ω , si misurano V_o e V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$.
10. Si ripete il punto 9 per i valori di R_L di 3,3k Ω ; 4,7k Ω ; 8,2k Ω ; 10k Ω ; 15k Ω ; 22k Ω ; 27k Ω ; 33k Ω ; 47k Ω ; 56k Ω .
11. Si riportano i valori misurati in una tabella in cui compaiono i valori teorici di V_o e I_L , per un immediato confronto e verifica del funzionamento.
12. Si traggono le conclusioni

Tabulazione dei dati

TABELLA I - VARIA LA TENSIONE D'INGRESSO V_i						
k Ω	Valori misurati				Val. calcolati	
	Volt			μA	Volt	μA
R_L	V_i	V_o	V_L	I_L	V_o	I_L
1	-11,90	-0,730	-0,366	-366	-0,73	-364
1	-10	-0,614	-0,307	-307	-0,61	-303
1	-8	-0,490	-0,245	-245	-0,48	-242
1	-6	-0,368	-0,184	-184	-0,36	-182
1	-4	-0,241	-0,123	-123	-0,24	-121
1	-2	-0,122	-0,062	-62	-0,12	-60,6
1	-1	-0,061	-0,031	-31	-0,06	-30,3
1	1	0,062	0,0303	30,3	0,06	30,3
1	2	0,124	0,061	61	0,12	60,6
1	4	0,248	0,123	123	0,24	121
1	6	0,371	0,184	184	0,36	182
1	8	0,491	0,246	246	0,48	242
1	10	0,614	0,297	297	0,61	303
1	11,95	0,733	0,367	367	0,73	364

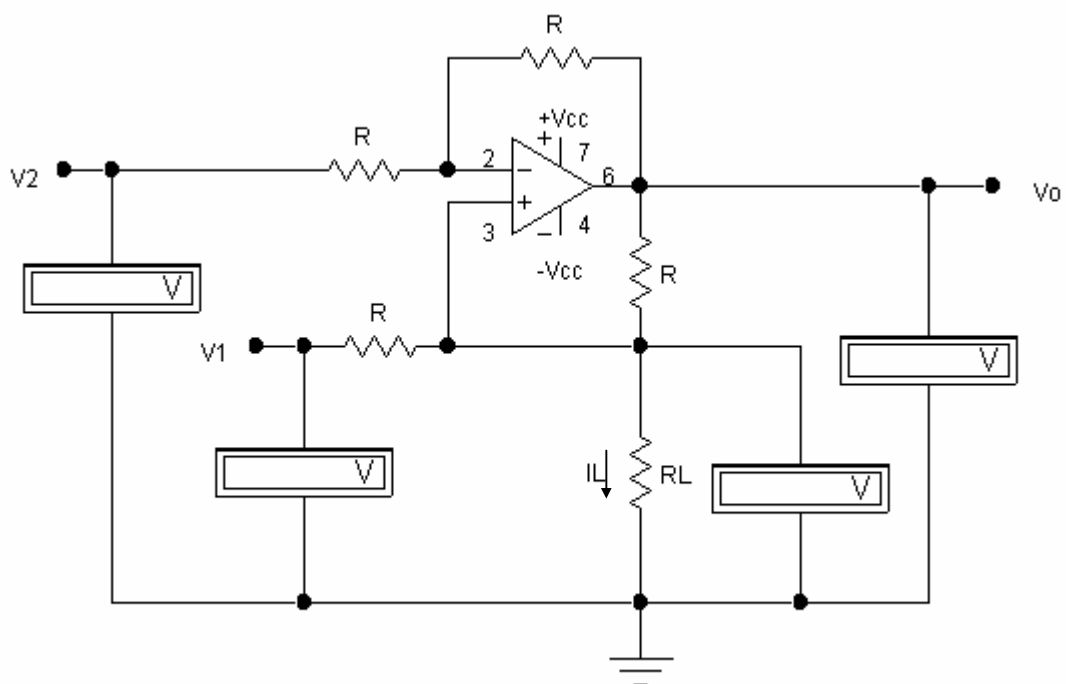
TABELLA II - VARIA LA RESISTENZA DI CARICO R_L						
k Ω	Valori misurati				Val. calcolati	
	Volt			μA	Volt	μA
R_L	V_i	V_o	V_L	I_L	V_o	I_L
1	5	0,309	0,154	154	0,30	151
2,2	5	0,669	0,335	152,3	0,67	151
3,3	5	1,017	0,506	153,2	1	151
4,7	5	1,434	0,714	152	1,42	151
8,2	5	2,52	1,261	154	2,48	151
10	5	3,04	1,516	151,6	3,03	151
15	5	4,57	2,291	152,7	4,54	151
22	5	6,78	3,390	154	6,67	151
27	5	8,51	4,23	157	8,18	151
33	5	10,04	4,99	151,2	10	151
47	5	11,16	5,97	127	14,24	151
56	5	11,17	6,51	116	16,97	151

Conclusioni

Tabella I: il circuito funziona in modo lineare.

Tabella II: il funzionamento del circuito rimane lineare, con corrente I_L pressoché costante, fino a quando il valore della resistenza R_L di carico non supera il valore massimo di 33k Ω .

CONFIGURAZIONE DIFFERENZIALE



Richiami teorici

Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si ha: $I_L = \frac{V_1}{R} + \left(-\frac{V_2}{R}\right) = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{V_d}{R}$.

La corrente nel carico, una volta fissato il valore di R , dipende solo dalla tensione differenziale d'ingresso $V_d = V_1 - V_2$.

Valori limite per V_d e R_L

Il circuito funziona in modo lineare, ossia $I_L = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{V_d}{R}$, fintanto che l'uscita non satura. La tensione d'uscita V_o dipende da V_1 , V_2 (quindi da V_d), R_L ed R . Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si ha:

$$V_o = \frac{2R_L}{R} V_1 - \frac{R + 2R_L}{R} V_2 = \frac{2R_L(V_1 - V_2)}{R} - V_2 = \frac{2R_L}{R} V_d - V_2$$

$$\text{Se } R_L \ll R \Rightarrow \frac{2R_L}{R} \ll 1 \Rightarrow V_o \cong -V_2$$

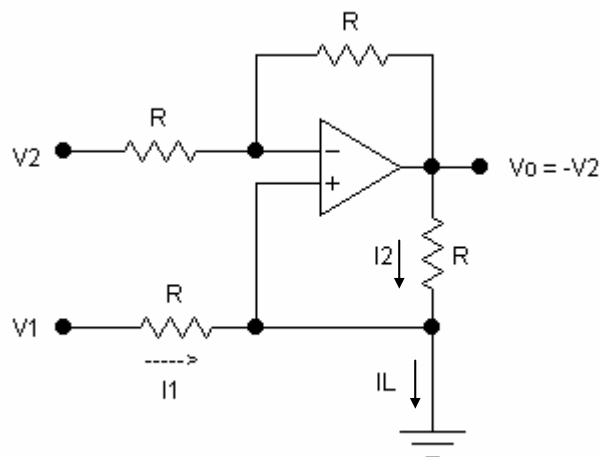
a. Fissati i valori di R ed R_L (con $R_L \ll R$) e le tensioni di saturazione $V_{oH} = V_{oL} = V_{CC} - 2V$, si calcolano i valori minimo e massimo di V_2 per i quali il comportamento del circuito è lineare:

$$- \text{ se } V_o = V_{oL} \Rightarrow V_2 = V_{2MAX} \cong -V_{oL} = V_{oH}$$

$$- \text{ se } V_o = V_{oH} \Rightarrow V_2 = V_{2MIN} \cong -V_{oH}$$

b. Fissati i valori di R , V_1 e V_2 , si ha:

$$- \text{ se } R_L = 0 \Rightarrow V_o = -V_2 \Rightarrow I_L = I_1 + I_2 = \frac{V_1}{R} - \frac{V_2}{R} = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{V_d}{R}$$



- se R_L cresce $\Rightarrow$ varia anche V_o . Si calcola, pertanto, R_L in funzione di V_1 , V_2 , V_o e R :

$$R_L = \frac{V_o + V_2}{2(V_1 - V_2)} R \quad \Rightarrow \quad R_{LMAX} = \frac{V_{oH} + V_2}{2(V_1 - V_2)} R$$

- Se si varia V_1 , tenendo costante R_L , la corrente I_L nel carico R_L dipenderà solo dalla differenza delle tensioni d'ingresso se V_2 varia tra V_{2MIN} e V_{2MAX} .
- Se si varia R_L , tenendo costanti V_1 e V_2 , la corrente I_L si mantiene costante $\left(I_L = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{V_d}{R} \right)$, purché il valore di R_L non superi il valore R_{LMAX} .

Dimensionamento del circuito e definizione delle misure

Si usa l'amplificatore operazionale TL081 e si fissano i valori $R = 33k\Omega$ e $V_{CC} = \pm 12V$; $V_{oH} = -V_{oL} = 10V$.

- Si mantiene fisso il valore di $R_L = 1k\Omega$ ($R_L \ll R$) e si varia V_1 e V_2 . Si misurano V_o e V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$. I valori limite di V_2 sono:

$$V_{2MAX} = -V_{2iMIN} \cong V_{oH} = 10V$$

Si fanno variare V_1 e V_2 tra $-12V$ e $+12V$.

- Si mantiene fisso il valore di $V_1 = 5V$ e $V_2 = 3V$ e si varia R_L . Si misurano V_o e V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$. Il valore limite per R_L è:

$$R_{LMAX} = \frac{V_{oH} + V_2}{2(V_1 - V_2)} R = \frac{10 + 3}{2 \cdot (5 - 3)} \cdot 33 \cdot 10^3 = 107,25k\Omega$$

Si farà variare R_L tra $1k\Omega$ e $150k\Omega$.

Si misura, in entrambi i casi, la tensione d'uscita V_o .

Strumenti e apparecchiature

Alimentatore stabilizzato duale $\pm 12V$; due alimentatori stabilizzati variabili $0 \div 20V$; multimetro digitale 4½ digit come voltmetro; basetta di bread-board.

Componenti attivi e passivi necessari

Resistenze: 4x33kΩ; 1x1kΩ; 1x10kΩ; 1x33kΩ; 1x47kΩ; 1x68kΩ; 1x82kΩ; 1x100kΩ; 1x150kΩ.

Circuiti integrati: 1xTL081

Procedimento di verifica

1. Montato e alimentato il circuito, si collegano agli ingressi i due alimentatori variabili in modo che V_1 e V_2 risultino negativi rispetto a massa (i terminali rossi a massa e quelli neri agli ingressi).
2. Si regolano, mediante il voltmetro, $V_1 = -12V$ e $V_2 = -12V$.
3. Si misurano V_o e V_L e, con i valori misurati, si calcola I_L come rapporto $\frac{V_L}{R_L}$.
4. Si ripetono i punti 2 e 3 per le seguenti coppie di valori: $V_1 = -8V$ e $V_2 = -12V$; $V_1 = -4V$ e $V_2 = -12V$; $V_1 = -1V$ e $V_2 = -12V$; $V_1 = -12V$ e $V_2 = -9V$; $V_1 = -8V$ e $V_2 = -9V$; $V_1 = -4V$ e $V_2 = -9V$; $V_1 = -1V$ e $V_2 = -9V$; $V_1 = -12V$ e $V_2 = -6V$; $V_1 = -8V$ e $V_2 = -6V$; $V_1 = -4V$ e $V_2 = -6V$; $V_1 = -1V$ e $V_2 = -6V$; $V_1 = -12V$ e $V_2 = -3V$; $V_1 = -8V$ e $V_2 = -3V$; $V_1 = -4V$ e $V_2 = -3V$; $V_1 = -1V$ e $V_2 = -3V$.
5. Si invertono i morsetti degli alimentatori variabili in modo che V_1 e V_2 risultino positivi rispetto a massa (i terminali neri a massa e quelli rossi agli ingressi).
6. Si ripetono i punti 2 e 3 per le seguenti coppie di valori: $V_1 = 12V$ e $V_2 = 12V$; $V_1 = 8V$ e $V_2 = 12V$; $V_1 = 4V$ e $V_2 = 12V$; $V_1 = 1V$ e $V_2 = 12V$; $V_1 = 12V$ e $V_2 = 9V$; $V_1 = 8V$ e $V_2 = 9V$; $V_1 = 4V$ e $V_2 = 9V$; $V_1 = 1V$ e $V_2 = 9V$; $V_1 = 12V$ e $V_2 = 6V$; $V_1 = 8V$ e $V_2 = 6V$; $V_1 = 4V$ e $V_2 = 6V$; $V_1 = 1V$ e $V_2 = 6V$; $V_1 = 12V$ e $V_2 = 3V$; $V_1 = 8V$ e $V_2 = 3V$; $V_1 = 4V$ e $V_2 = 3V$; $V_1 = 1V$ e $V_2 = 3V$.
7. Si invertono i morsetti dell'alimentatore variabile in modo che V_1 risulti negativo rispetto a massa (il terminale rosso a massa e quello nero all'ingresso).
8. Si ripetono i punti 2 e 3 per le seguenti coppie di valori: $V_1 = -12V$ e $V_2 = 12V$; $V_1 = -8V$ e $V_2 = 12V$; $V_1 = -4V$ e $V_2 = 12V$; $V_1 = -1V$ e $V_2 = 12V$; $V_1 = -12V$ e $V_2 = 9V$; $V_1 = -8V$ e $V_2 = 9V$; $V_1 = -4V$ e $V_2 = 9V$; $V_1 = -1V$ e $V_2 = 9V$; $V_1 = -12V$ e $V_2 = 6V$; $V_1 = -8V$ e $V_2 = 6V$; $V_1 = -4V$ e $V_2 = 6V$; $V_1 = -1V$ e $V_2 = 6V$; $V_1 = -12V$ e $V_2 = 3V$; $V_1 = -8V$ e $V_2 = 3V$; $V_1 = -4V$ e $V_2 = 3V$; $V_1 = -1V$ e $V_2 = 3V$.
9. Si invertono i morsetti degli alimentatori variabili in modo che V_1 risulti positivo rispetto a massa (il terminale nero a massa e quello rosso all'ingresso) e V_2 risulti negativo rispetto a massa (il terminale rosso a massa e quello nero all'ingresso).
10. Si ripetono i punti 2 e 3 per le seguenti coppie di valori: $V_1 = 12V$ e $V_2 = -3V$; $V_1 = 8V$ e $V_2 = -3V$; $V_1 = 4V$ e $V_2 = -3V$; $V_1 = 1V$ e $V_2 = -3V$; $V_1 = 12V$ e $V_2 = -6V$; $V_1 = 8V$ e $V_2 = -6V$; $V_1 = 4V$ e $V_2 = -6V$; $V_1 = 1V$ e $V_2 = -6V$; $V_1 = 12V$ e $V_2 = -9V$; $V_1 = 8V$ e $V_2 = -9V$; $V_1 = 4V$ e $V_2 = -9V$; $V_1 = 1V$ e $V_2 = -9V$; $V_1 = 12V$ e $V_2 = -12V$; $V_1 = 8V$ e $V_2 = -12V$; $V_1 = 4V$ e $V_2 = -12V$; $V_1 = 1V$ e $V_2 = -12V$.
11. Si riportano i valori misurati in una tabella in cui compaiono i valori teorici di V_o e I_L , per un immediato confronto e verifica del funzionamento.
12. Si regolano le tensioni d'ingresso a $V_1 = +5V$ e $V_2 = +3V$, collegando opportunamente gli alimentatori variabili (i terminali neri a massa e quelli rossi agli ingressi), si misurano V_o e V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$.
13. Si inserisce una resistenza R_L di $10k\Omega$, si misurano V_o e V_L e si calcola $I_L = \frac{V_L}{R_L}$.
14. Si ripete il punto 13 per i valori di R_L di $33k\Omega$; $47k\Omega$; $68k\Omega$; $82k\Omega$; $100k\Omega$; $150k\Omega$.
15. Si riportano i valori misurati in una tabella in cui compaiono i valori teorici di V_o e I_L , per un immediato confronto e verifica del funzionamento.
16. Si traggono le conclusioni

Tabulazione dei dati

TABELLA I - VARIANO LE TENSIONI D'INGRESSO V_1 E V_2							
k Ω	Valori misurati				Val. calcolati		
	Volt				μA	Volt	μA
R_L	V_1	V_2	V_o	V_L	I_L	V_o	I_L
1	-12	-12	11,05	-0,024	-24	12	0
	-8	-12	11,05	0,088	88	12,24	121
	-4	-12	11,05	0,204	204	12,48	242
	-1	-12	11,05	0,291	291	12,66	333
1	-12	-9	8,79	-0,089	-89	8,82	-91
	-8	-9	9,04	0,030	30	9,06	30,3
	-4	-9	9,29	0,153	153	9,30	151
	-1	-9	9,47	0,245	245	9,48	242
1	-12	-6	5,62	-0,181	-181	5,64	-182
	-8	-6	5,86	-0,661	-661	5,89	-60,6
	-4	-6	6,11	0,061	61	6,12	60,6
	-1	-6	6,29	0,153	153	6,30	151
1	-12	-3	2,45	-0,274	-274	2,45	-273
	-8	-3	2,69	-0,154	-154	2,69	-151
	-4	-3	2,935	-0,0306	-306	2,94	-30,3
	-1	-3	3,12	0,061	61	3,12	60,6
1	12	3	-2,45	0,275	275	-2,45	273
	8	3	-2,69	0,153	153	-2,69	151
	4	3	-2,935	0,0307	307	-2,94	30,3
	1	3	-3,12	-0,0612	-612	-3,12	-60,6
1	12	6	-5,65	0,182	182	-5,64	182
	8	6	-5,90	0,0606	606	-5,89	60,6
	4	6	-6,15	-0,0614	-614	-6,12	-60,6
	1	6	-6,33	-0,154	-154	-6,30	-151
1	12	9	-8,84	0,090	90	-8,82	90,9
	8	9	-9,08	-0,0305	-305	-9,06	-30,3
	4	9	-9,33	-0,153	-153	-9,30	-151
	1	9	-9,51	-0,246	-246	-9,48	-243
1	12	12	-10,40	0,0447	447	-12	0
	8	12	-10,41	-0,069	-69	-12,24	-121
	4	12	-10,41	-0,185	-185	-12,48	-242
	1	12	-10,41	-0,273	-273	-12,66	-333
1	-12	12	-10,41	-0,301	-301	-13,45	-727
	-8	12	-10,41	-0,532	-532	-13,21	-606
	-4	12	-10,41	-0,417	-417	-12,97	-485
	-1	12	-10,41	-0,330	-330	-12,79	-394
1	-12	9	-10,28	-0,642	-642	-10,27	-636
	-8	9	-10,07	-0,523	-523	-10,03	-515
	-4	9	-9,82	-0,400	-400	-9,79	-394
	-1	9	-9,64	-0,308	-308	-9,60	-212
1	-12	6	-7,12	-0,551	-551	-7,09	-545
	-8	6	-6,88	-0,431	-431	-6,85	-424
	-4	6	-6,64	-0,308	-308	-6,60	-304
	-1	6	-6,45	-0,216	-216	-6,42	-212

1	-12	3	-3,91	-0,458	-458	-3,91	-454
	-8	3	-3,68	-0,338	-338	-3,67	-333
	-4	3	-3,43	-0,215	-215	-3,42	-212
	-1	3	-3,25	-0,123	-123	-3,24	-121
1	12	-3	3,89	0,456	456	3,91	454
	8	-3	3,674	0,338	338	3,67	333
	4	-3	3,43	0,215	215	3,42	212
	1	-3	3,24	0,123	123	3,24	121
1	12	-6	7,08	0,548	548	7,09	545
	8	-6	6,84	0,427	427	6,85	424
	4	-6	6,60	0,308	308	6,60	304
	1	-6	6,41	0,215	215	6,42	212
1	12	-9	10,27	0,641	641	-10,27	636
	8	-9	10,03	0,520	520	-10,03	515
	4	-9	9,78	0,396	396	-9,79	394
	1	-9	9,60	0,307	307	-9,60	303
1	12	-12	11,06	0,664	664	-13,45	727
	8	-12	11,06	0,550	550	-13,21	606
	4	-12	11,06	0,434	434	-12,97	485
	1	-12	11,06	0,350	350	-12,79	394

TABELLA I - VARIANO LE TENSIONI D'INGRESSO V_1 E V_2							
k Ω	Valori misurati					Val. calcolati	
	Volt				μA	Volt	μA
R_L	V_1	V_2	V_o	V_L	I_L	V_o	I_L
1	5	3	-2,88	0,0616	61,6	-2,88	60,6
10	5	3	-1,78	0,607	60,7	-1,79	60,6
33	5	3	1,042	2,014	61	1,00	60,6
47	5	3	2,794	2,885	61,4	2,70	60,6
68	5	3	5,39	4,16	61,2	5,24	60,6
82	5	3	7,09	5,00	61	6,94	60,6
100	5	3	9,26	6,06	60,6	9,12	60,6
150	5	3	11,20	7,30	48,7	15,18	60,6

Conclusioni

Tabella I: la risposta del circuito è lineare finché l'uscita si mantiene al di sotto dei 10V, ossia non satura. I valori per i quali il circuito non è lineare sono quelli per i quali la tensione d'uscita calcolata supera i 10V.

Tabella II: la risposta del circuito rimane lineare e costante finché il valore della resistenza R_L di carico non supera il valore massimo di 100k Ω .