

Titolo dell'unità didattica:

L'amplificatore operativo reale

Insegnante tecnico-pratico:

Francesco Parisi

Destinatari:

Allievi di una V classe (I.T.I.S. o I.P.I.A.)

Scopo

Lo scopo di questa unità didattica è quella di mettere in evidenza i limiti dell'amplificatore operativo reale, rispetto alle ipotesi di idealità applicate nello studio teorico.

Tempi indicativi

L'unità didattica si svolgerà nell'arco di almeno tre lezioni di laboratorio (da due ore ciascuna) per un totale preventivato di almeno 6 ore.

Metodologie

Lezione frontale/dialogica, Laboratorio

Strumenti e tecniche

Libro di testo; data-book amplificatori operazionali; appunti e/o dispense; strumentazione elettronica: generatore di funzioni $0 \div 2\text{MHz}$, oscilloscopio doppia traccia da 20 MHz; bread-board; alimentatore duale $\pm 15\text{V}$; componenti elettronici: op.amp. $\mu\text{A}741$, op.amp. TL081 (o LF351), 2 resistori da 10 k Ω /5%, 1 condensatore poliestere da 100 nF; personal computer Windows dotato di software di simulazione CAD/CAE

(es. Electronics Workbench) e software di office automation (es. Microsoft Office).

Elenco delle esperienze

- 1) Massa virtuale
- 2) Correnti di polarizzazione
- 3) Correnti di polarizzazione e tensione di offset
- 4) Slew rate

Obiettivi e Conoscenze

Conoscere i principali limiti dell'amplificatore operazionale reale rispetto al modello ideale; conoscere le differenze sostanziali fra op.amp. a tecnologia bipolare (μ A741) e op.amp. a tecnologia unipolare (TL081 o LF351).

Competenze

Sapere interpretare le principali caratteristiche tecniche di un op.amp. fornite dal costruttore; saper scegliere il tipo di amplificatore operazionale in relazione all'applicazione che si vuole sviluppare e al budget a disposizione.

Verifica

Agli allievi verrà chiesto di realizzare individualmente un elaborato scritto sull'attività svolta, sulla quale verterà la valutazione. La valutazione terrà conto dei contenuti, della qualità e della forma dell'esposizione, nonché del linguaggio tecnico adoperato.

1) MASSA VIRTUALE

Premessa: in un op.amp. reale l'equipotenzialità degli ingressi ($V_+ = V_-$) non è più rispettata quando il guadagno a catena aperta (A_d) non assume valori elevati.

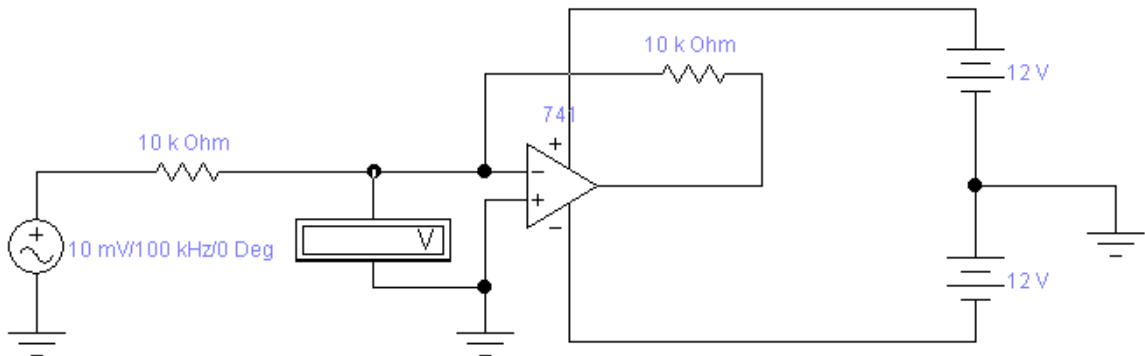


fig.1

Procedimento: montato il circuito di figura 1, si misurerà inizialmente la tensione sull'ingresso invertente (V_-); per frequenze basse (decine, centinaia di Hertz) tale valore sarà di pochi μV ovvero tendente a $0V$ (massa virtuale). Man mano che si salirà di frequenza, A_d si abbassa (a causa del polo introdotto dalla compensazione interna del $\mu A741$) e si vedrà che l'ampiezza di V_- sarà sempre più crescente e quindi non più approssimabile a $0V$.

Riportare in una tabella, il valore della tensione sul morsetto invertente in corrispondenza di un insieme di valori di frequenza compresi fra 0 e la f_T dell'amplificatore operazionale.

N.B. Assicurarsi che il voltmetro abbia una resistenza interna molto elevata (es. $100 M\Omega$)

Risultati: E' stato usato il software di simulazione (CAE) Electronics Workbench. L'operazionale impiegato è stato il $\mu A741$ ($f_T=1\text{MHz}$). Sono stati rilevati i valori per alcune decadi:

f[Hz]	V-
1	0,01 μV
100	0,12 μV
1k	1,05 μV
10k	105,2 μV
100k	1,037mV
1Meg	5,116mV

Si può notare come la tensione sull'ingresso invertente aumenti in modo pressoché lineare, in accordo con l'andamento del prodotto guadagno larghezza di banda (che nel caso del $\mu A741$ è di 1 MHz).

2) CORRENTI DI BIAS

Premessa: in un op.amp. reale le correnti di polarizzazione non sono mai nulle, ma assumono valori che sono delle ordine delle decine di pA, per gli op.amp. con ingressi a FET e delle decine-centinaia di nA, per gli op.amp. con ingressi a BJT.

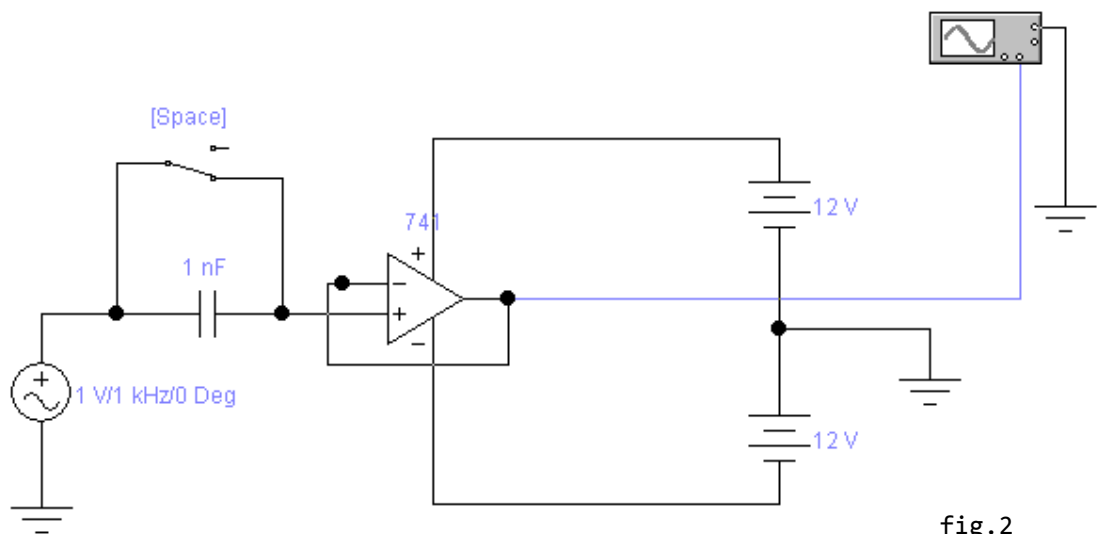


fig.2

Procedimento: per analizzare l'effetto delle sole correnti di polarizzazione, si monter  il circuito di fig.2

Un segnale sinusoidale (con valore medio nullo) viene applicato, tramite una capacit  di ingresso, a un inseguitore di tensione; l'interruttore in parallelo alla capacit    inizialmente chiuso; successivamente viene aperto. Una capacit  dovrebbe comportarsi sostanzialmente come un bipolo cortocircuito per un segnale alternato eppure si osserva che il valore medio del segnale d'uscita si abbassa fino a portare il segnale stesso alla saturazione negativa. Tutto ci  dimostra la presenza di una corrente costante di polarizzazione di ingresso, che viene integrata dalla capacit . Questo   dovuto al fatto che, dall'istante t_1 (successivo all'apertura dell'interruttore) viene a trovarsi

sommato alla tensione d'uscita un offset negativo, sempre più crescente (andamento lineare: rampa) che porterà il segnale alla saturazione negativa.

La rampa altro non è che l'integrale di una costante ovvero l'integrale della corrente di polarizzazione:

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{t1}^{t2} ic(t) dt + Vc(t1) = \frac{1}{C} Ib_+ (t2 - t1) + Vc(t1)$$

Risultati: è stato usato il software CAD/CAE, Electronics Workbench. Nella figura successiva sono riportati i risultati, per $C=1nF$.

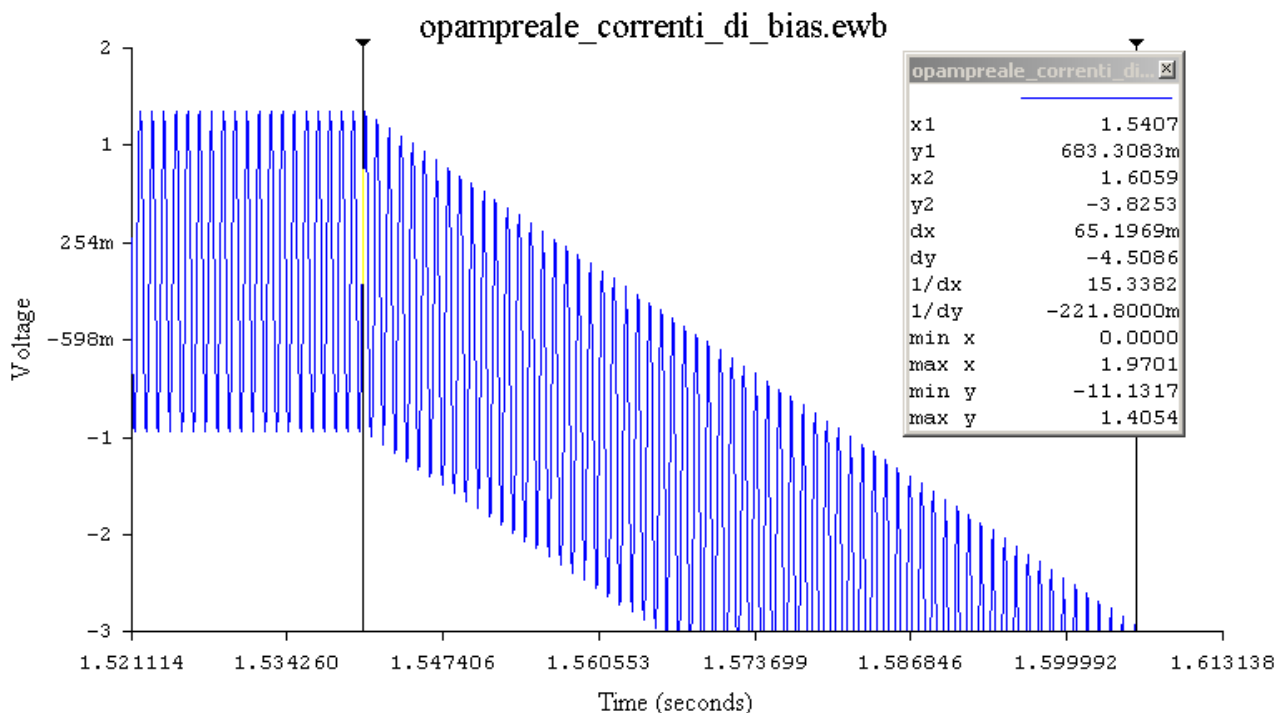


fig.3

Calcoli: è possibile stimare la corrente di polarizzazione Ib_+ . Infatti, essendo Ib_+ la corrente circolante nel condensatore, dall'equazione costitutiva del bipolo capacità:

$$ic(t) = C \cdot \frac{dV}{dt}$$

Possiamo calcolare I_{b+} come

$$I_{b+} = C \cdot \frac{\Delta V_o}{\Delta t}$$

I valori ΔV_o e Δt sono forniti direttamente da Electronics Workbench (vedi figura 3) e risultano pari, rispettivamente, a $dy=-4,5V$ e $dx=65,2ms$, per cui ricaviamo che $I_{b+}=69nA$ ($80nA$ è il valore tipico desunto dal datasheet dell' LM741).

Note sull'esperienza: è possibile ripetere l'esperimento con un op.amp. con ingressi a FET, come, per esempio, il TL081 (o l'LF351) per constatare che la saturazione negativa non viene mai raggiunta e questo a conferma del fatto che le correnti di polarizzazione sono praticamente inesistenti (nell'ordine delle decine di pA) in questi tipi di op.amp. Se viene impiegata strumentazione reale analogica è consigliabile avere un tempo più lungo e quindi scegliere la capacità di un valore più elevato, esempio $C=100nF$)

3) TENSIONE DI OFFSET E CORRENTI DI BIAS

Premessa: in un op.amp. reale oltre alle correnti di polarizzazione d'ingresso c'è anche una tensione di offset; entrambi fanno sentire il loro effetto, combinato, anche non applicando alcun segnale in ingresso.

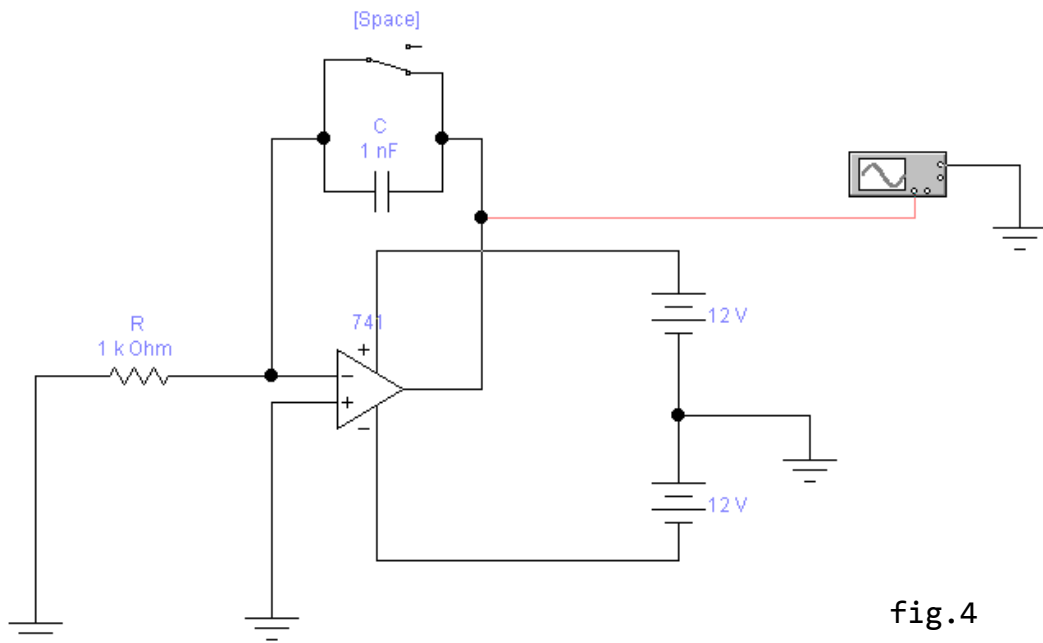


fig.4

Procedimento: per mostrare l'effetto della tensione di offset, combinato con quelle delle correnti di polarizzazione, verrà utilizzato il circuito integratore di fig.4. Fino all'istante t_1 l'interruttore è chiuso: il circuito si comporta come un amplificatore non invertente a guadagno unitario (inseguitore di tensione), ma, sebbene l'ingresso invertente sia collegato a 0V, in uscita ci ritroviamo una tensione che è quella di offset; in questa situazione, non c'è alcun effetto prodotto dalle correnti di polarizzazione (I_{b+} è shuntata a massa e I_{b-} non produce nessuna tensione essendo $R_f=0$).

Quando, tuttavia, l'interruttore si apre all'istante $t=t_1$, il circuito incomincia ad effettuare l'integrazione della

tensione di offset e della corrente di polarizzazione. La situazione può essere descritta nello schema seguente:

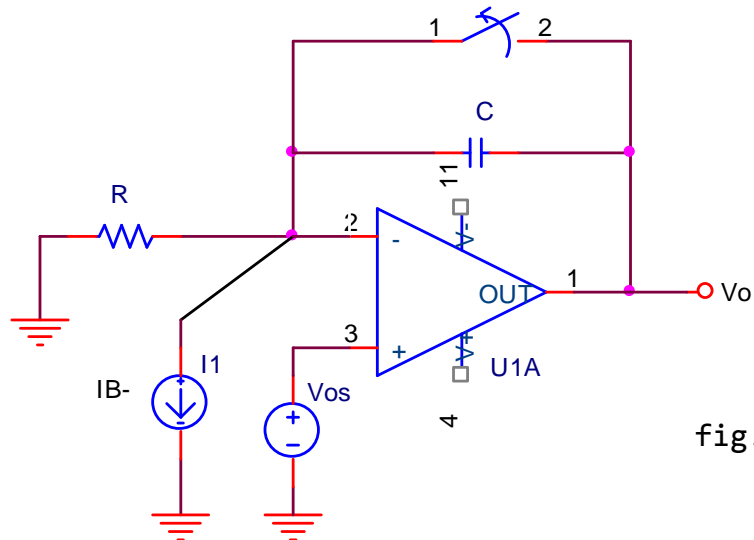


fig.5

Utilizzando il metodo della sovrapposizione degli effetti al circuito di fig. 5 è facile mostrare che la tensione di uscita, per $t \geq t_1$, è data da:

$$v_o(t) = V_{os} + \frac{V_{os}}{RC}t + \frac{I_{B-}}{C}t \quad (\text{per } t \geq t_1)$$

La tensione di uscita $v_o(t)$ è quindi una rampa a pendenza costante, determinata dal valore della tensione di offset V_{os} e dal valore della corrente di polarizzazione I_{B-} che raggiungerà il valore di saturazione (positivo o negativo a secondo del segno della tensione di offset); per evitare la saturazione, bisogna provvedere a chiudere di nuovo l'interruttore prima che ciò avvenga.

Risultati: come si può vedere dal grafico riportato in figura 6, prima dell'istante t_1 (nel grafico $x_1=5,59s$) la tensione di uscita coincide con la tensione di offset, che risulta essere di circa $19 \mu V$.

Successivamente all'istante t_1 , viene aperto l'interruttore e la tensione d'uscita assume un andamento crescente pressoché lineare, questo fino a raggiungere la saturazione positiva (circa 11V) dopo un tempo di circa 240ms (riportato nel grafico con dx)

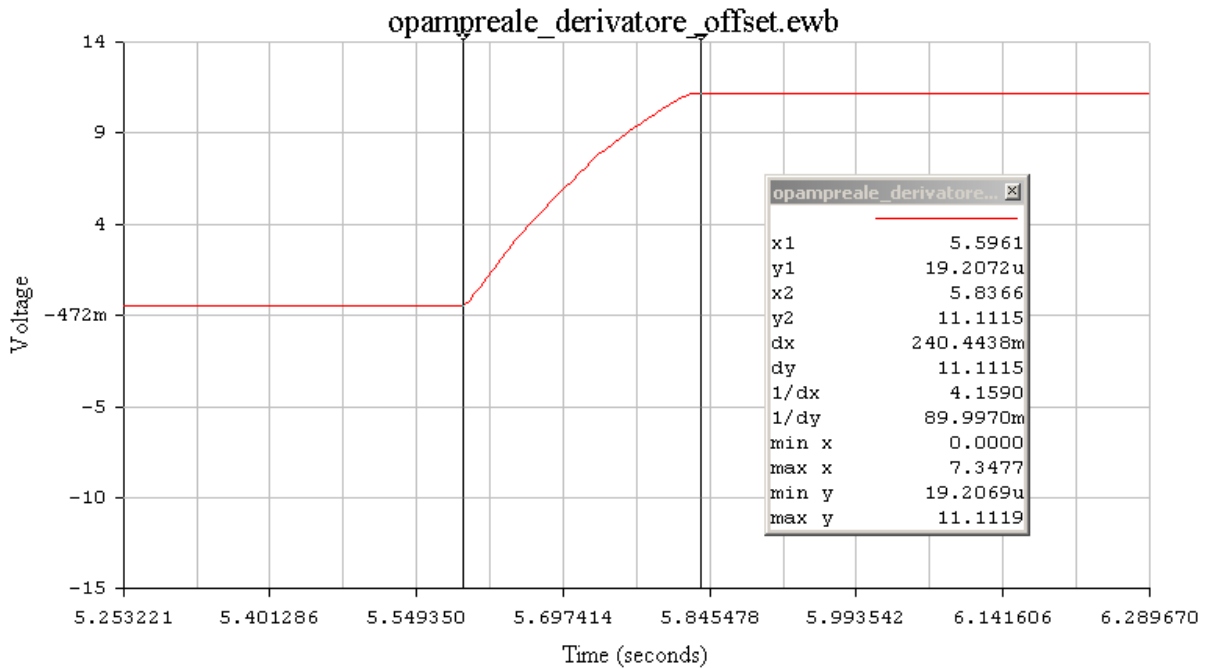


fig.6

Note sull'esperienza: se si adoperava strumentazione reale, bisognerà utilizzare un oscilloscopio a memoria, o digitale, che consenta il salvataggio della forma d'onda nel transitorio; nel caso non si disponga di tale strumentazione si potrà impiegare un multimetro in continua, preferibilmente analogico, così da poter meglio apprezzare visivamente il fenomeno.

4) SLEW RATE

Premessa: i circuiti che compongono gli amplificatori operazionali non possono rispondere in modo istantaneo alle variazioni dei segnali di ingresso. Questa limitazione è descritta dal parametro *slew rate* (SR), fornito dal costruttore per un guadagno unitario. Lo *slew rate* rappresenta la velocità massima di variazione della tensione di uscita dell'op.amp., in condizioni di funzionamento ad ampi segnali.

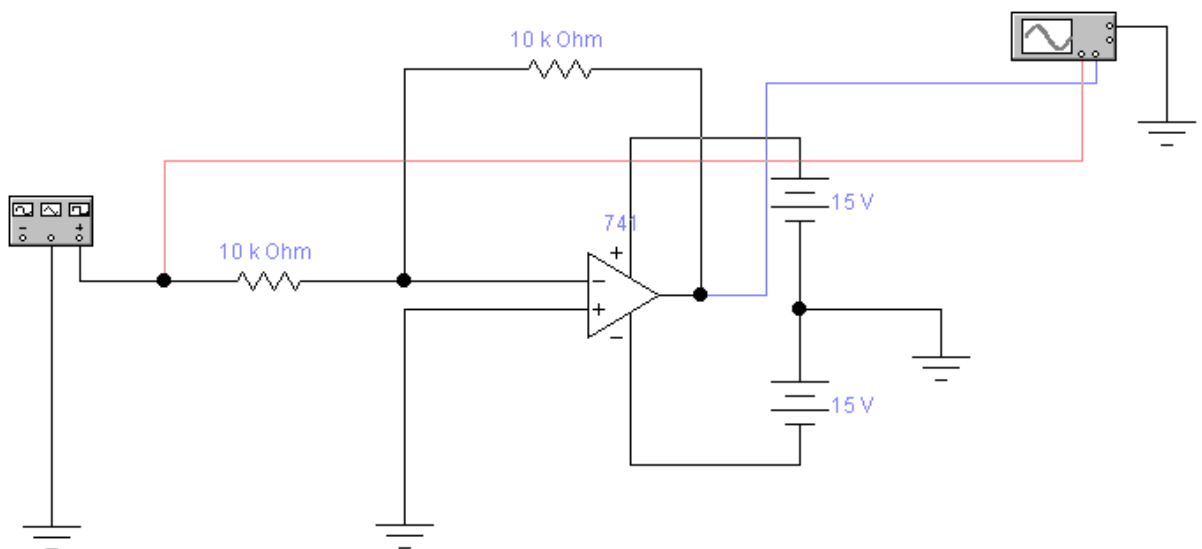


fig.7

Procedimento: per misurare lo *slew rate* si monterà una semplice configurazione invertente a guadagno unitario. Si farà dunque in modo che la massima velocità di variazione del segnale di uscita sia superiore allo *slew rate* dell'op.amp. Applicheremo, dunque, un segnale ad onda quadra da 20 kHz avente ampiezza di 4Vpp e si dovrà constatare che l'uscita non segue istantaneamente le variazioni del segnale di ingresso. Infatti, si dimostra facilmente che per non essere distorto un segnale a frequenza f , può avere un'escursione massima V_M data da:

$$V_M = \frac{SR}{2\pi f}$$

Sostituendo $f=20\text{kHz}$, ponendo $SR=0,5\text{V}/\mu\text{s}$, abbiamo $V_M=3,98\text{V}$

Risultati: la massima velocità è data dal rapporto fra la massima variazione di tensione e il tempo impiegato; dal grafico di fig. 8 risulta che si ha una variazione di tensione $\Delta V_0=3,79\text{V}$ in un tempo $\Delta t=8,73\mu\text{s}$ per cui si ha che $SR=0,43\mu\text{s}$. Il datasheet del LM741 riporta uno SR tipico di $0,5\mu\text{s}$ (per un guadagno unitario), per cui il dato rilevato può ritenersi accettabile.

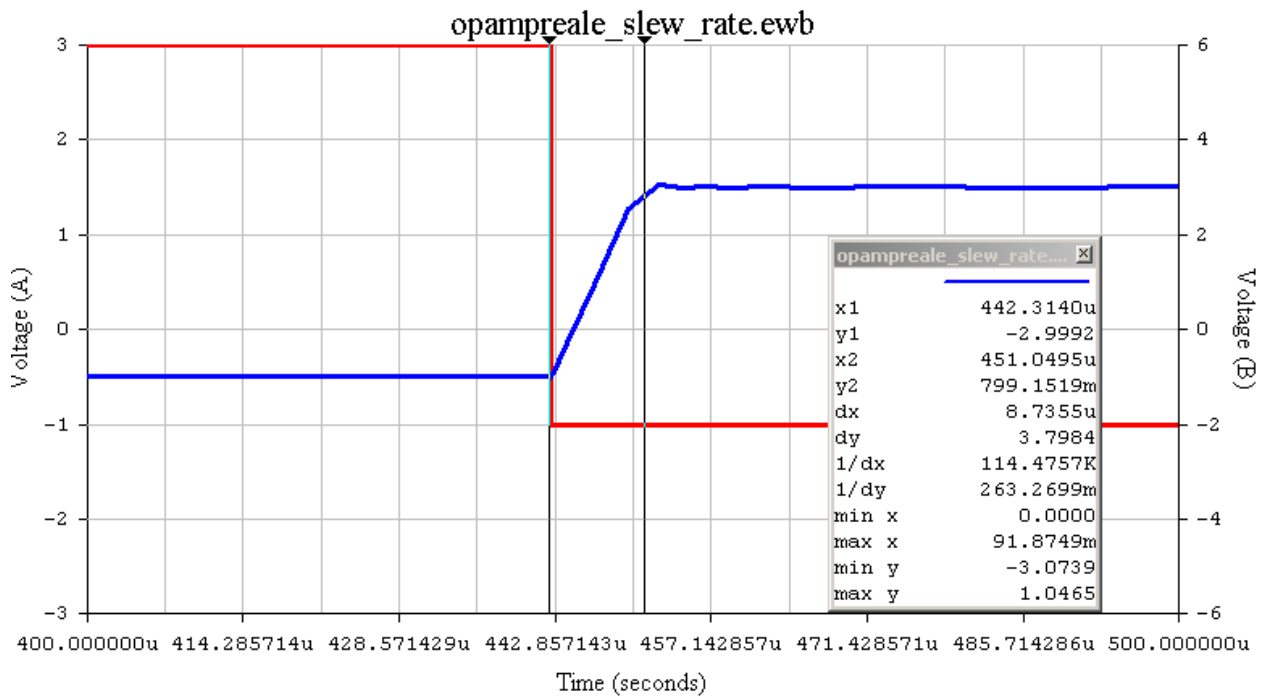


fig.8