

Laboratorio di Segnali e Sistemi

- Esercitazione -4 -

Amplificatore Operazionale 1



Claudio Luci
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

last update : 070117

Argomenti dell'esercitazione 4:

- Misura dello slew rate
- Misura del prodotto del guadagno per banda passante
- Circuito sommatore non invertente a 3 ingressi.

Importante: il sommatore servirà per l'esercitazione 9, quindi non “smontatelo”.
Fatelo in una parte “isolata” della scheda così non occupate tutto lo spazio.
Fate un montaggio “pulito”

N.B. per l'esercitazione 9 potreste aver bisogno di un emitter follower.
Realizzatelo sfruttando il secondo op-amp del “sommatore”

Argomenti dell'esercitazione 5:

- Filtro attivo passa basso
- Caratterizzazione del rumore prodotto dal generatore di segnali.
- DAC, ovvero sommatore non invertente a 4 ingressi con pesi 2^n

Importante: il filtro attivo servirà per l'esercitazione 9, mentre il DAC per l'esercitazione 6, quindi non “smontateli”.

Fateli in una parte “isolata” della scheda così non occupate tutto lo spazio.

Fate un montaggio “pulito”

Al termine dell'esperienza rimontare il filtro attivo VCVS nella versione $K \simeq 1.586$ (filtro Butterworth) e lasciarlo montato possibilmente nella stessa basetta in cui si trova il generatore di rumore (dovrà essere riutilizzato nell'esperienza 9).

Non smontare il generatore di rumore anch'esso farà parte dell'esperienza 9. Prendere nota delle condizioni di lavoro utilizzate durante questa esperienza in modo da ritrovare facilmente il punto di lavoro durante l'esperienza 9.

Cosa mettere nella relazione

- Slew rate (solo onda quadra)
- Misura del prodotto del Guadagno per la Banda Passante
- Sommatore (verifica del circuito)
- Filtro attivo passa basso

Facoltativo

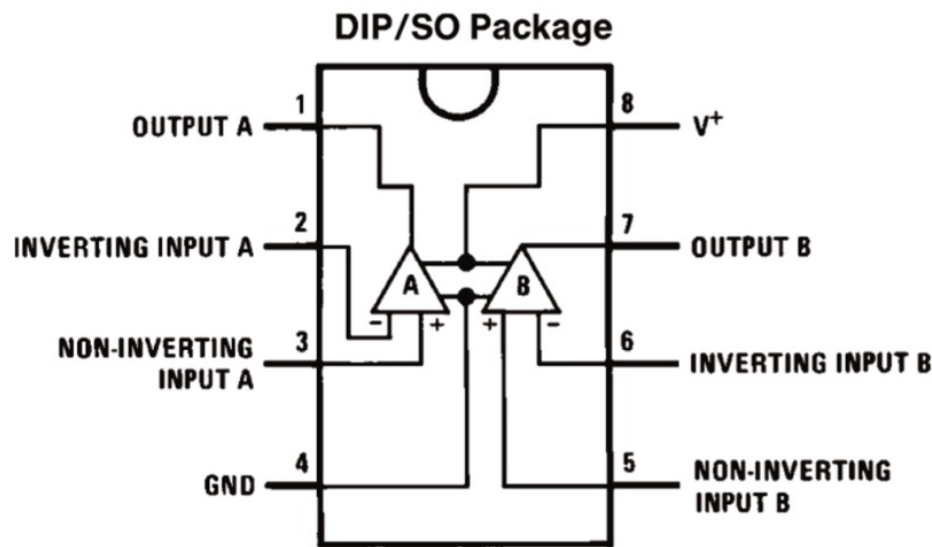
- Potete mettere in questa relazione la verifica del DAC, oppure la potete mettere nella prossima relazione sulla costruzione dell'ADC

A livello qualitativo (senza fare nessuna misura) si possono mettere degli snapshot dei circuiti seguenti:

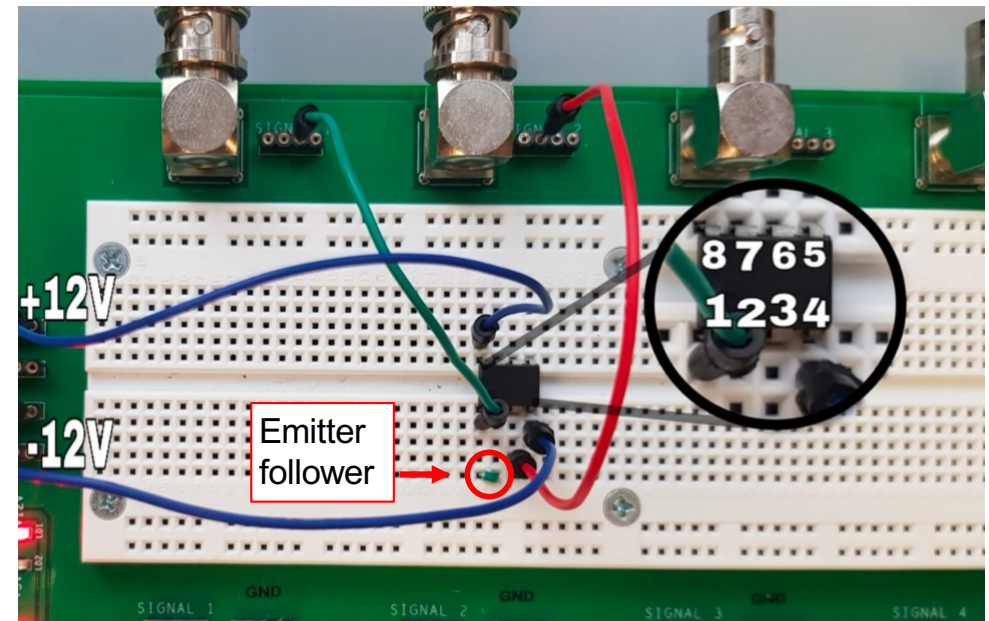
- Sommatore: battimenti, onda quadra più onda sinusoidale
- Derivatore

OP-AMP LM358 / TL082: piedinatura

- ❑ In laboratorio utilizzeremo l'amplificatore operazionale LM358 oppure TL-082. Sono entrambi dei circuiti integrati a 8 piedini che contengono due amplificatori operazionali.
- ❑ L'op-amp LM358, al contrario del TL082), può funzionare anche con alimentazione singola positiva e ground, ma è preferibile usare la doppia alimentazione collegando il negativo sul ground.
- ❑ La differenza tra le due tensioni deve essere inferiore a 32 V, quindi ad esempio si può usare ± 12 V.
- ❑ L'amplificatore non può erogare correnti elevate, quindi le resistenze della rete di reazione non possono essere troppo piccole, quindi usatele dell'ordine del kOhm.



L'integrato è visto dall'alto



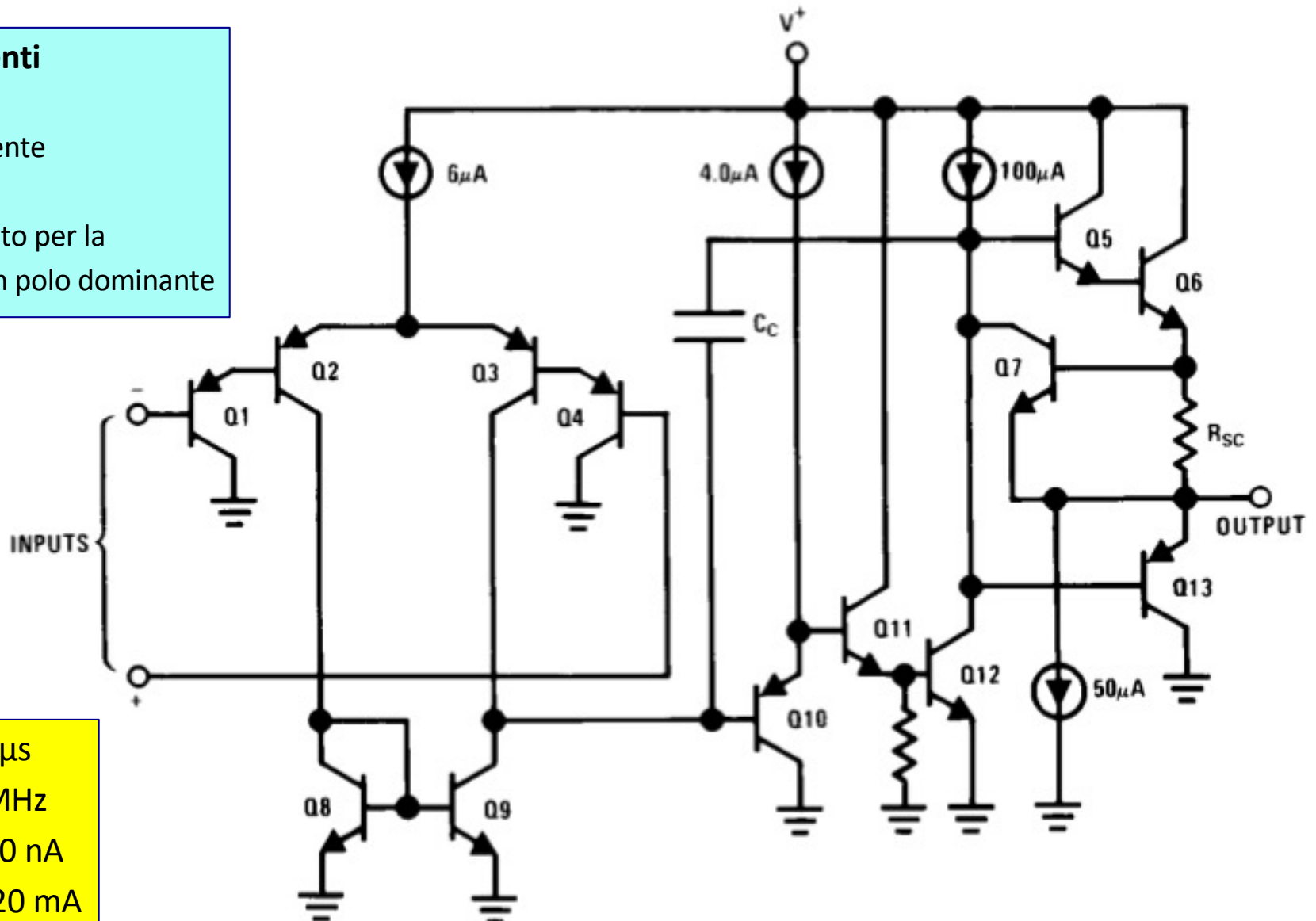
il TL082 ha la stessa piedinatura

OP-AMP LM358: schema del circuito

Schematic Diagram (Each Amplifier)

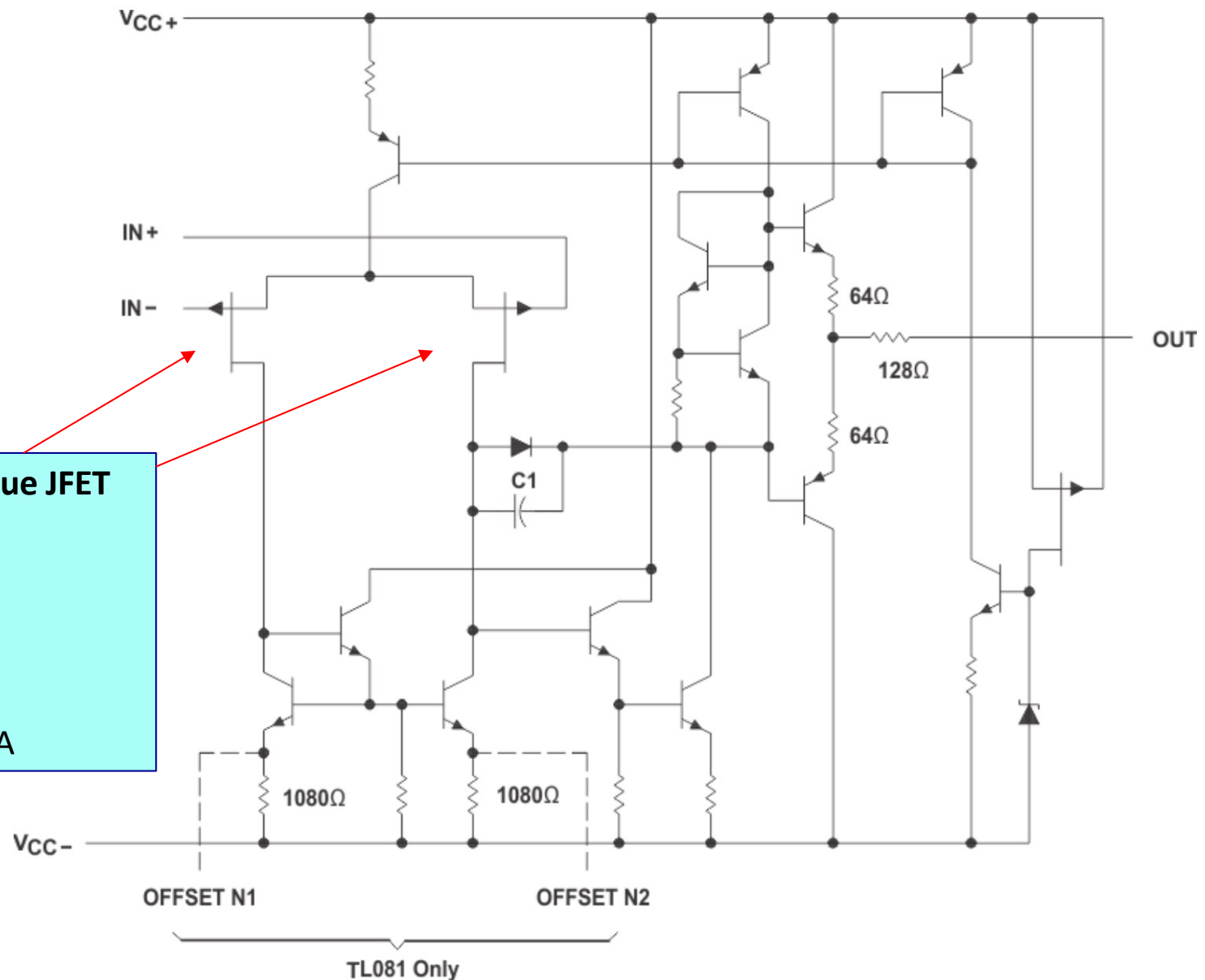
Componenti

12 BJT
4 regolatori di corrente
2 resistenze
1 condensatore usato per la
Compensazione con polo dominante



Slew rate: $0.3 \text{ V}/\mu\text{s}$
GBW (tipico): 1 MHz
Input current: 150 nA
Output current: 20 mA

OP-AMP TL-082: schema del circuito



In ingresso ci sono due JFET

Slew rate: 13 V/μs

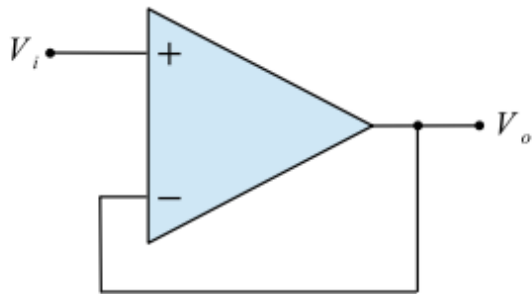
GBW (tipico): 3 MHz

Input current: 0.2 nA

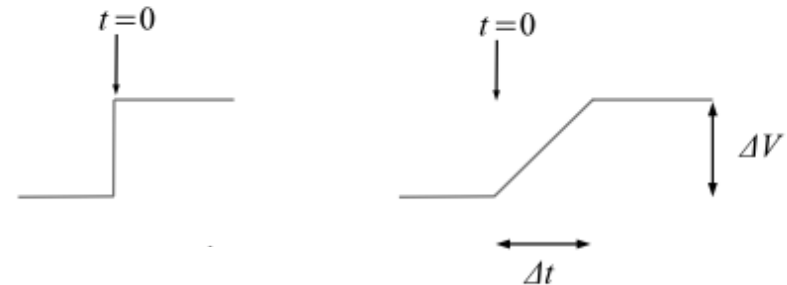
Output current: 10 mA

Misura dello slew rate

- ❑ Per misurare lo slew rate costruite un amplificatore non invertente con amplificazione unitaria (emitter follower).
- ❑ Inviare in ingresso un segnale rettangolare di ampiezza sufficientemente grande e osservate il segnale d'uscita con l'oscilloscopio.
- ❑ Dal confronto tra il tempo di salita e l'altezza del gradino si misura lo slew rate.
- ❑ Confrontatelo con quanto dichiarato dal costruttore nei fogli illustrativi



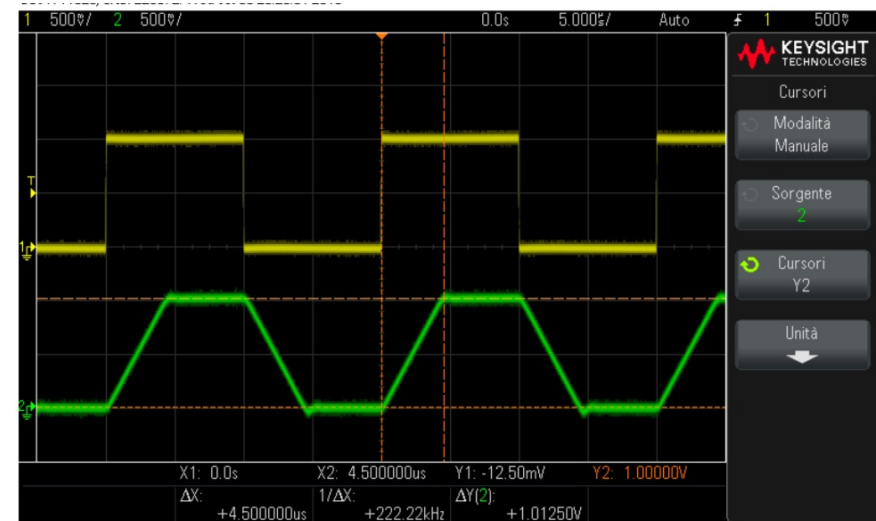
$$S = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$



LM358: $S = 0.3 \text{ V} / \mu\text{s}$

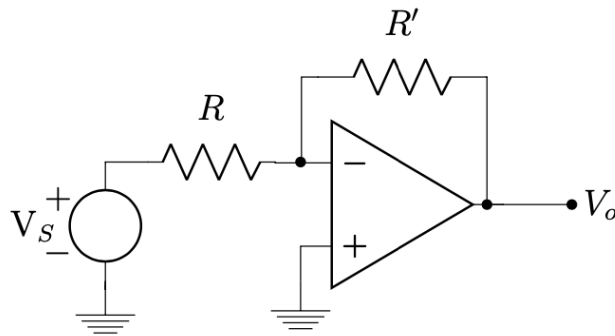
TL082: $S = 13 \text{ V} / \mu\text{s}$
(difficile da misurare in Lab)

Usate il LM358 per la misura dello slew rate
Mentre per tutte le altre usate il TL082



Effetto dello slew rate su un segnale sinusoidale

- ❑ Provate a valutare, molto velocemente, l'effetto che lo slew rate può avere su un segnale sinusoidale.
- ❑ Costruite un amplificatore invertente, che userete anche per la misura del GBW product, però per questa misura usate l'opamp LM358 mentre per il GBWP usate il TL082.



$$A = -\frac{R'}{R}$$

$$V_i = V_p \sin \omega t \Rightarrow V_u = A \cdot V_p \sin \omega t$$

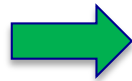
$$S = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$



$$S \geq \left(\frac{dV_u}{dt} \right)_{MAX}$$

- ❑ Lo slew rate può deformare il segnale d'uscita se non si rispetta la disuguaglianza:

$$\frac{dV_u}{dt} = A \cdot V_p \cdot \omega \sin \omega t$$



$$A \cdot V_p \cdot \omega \leq \left(\frac{dV_u}{dt} \right)_{MAX} = S$$



$$V_p \leq \frac{S}{2\pi f \cdot A}$$

scegliete una frequenza inferiore a quella di taglio (vedi misura successiva)

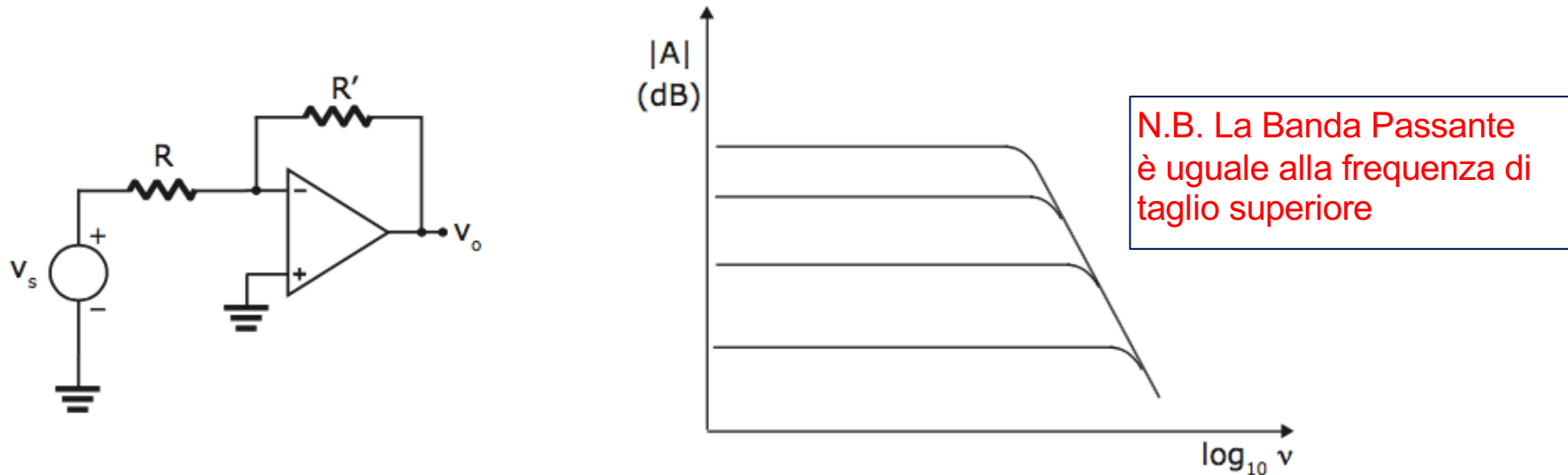
Ad esempio $A=10$ e $f=10$ kHz dovrebbero andare bene. In questo caso si ha:

$$V_p \leq \frac{S}{2\pi f \cdot A} = \frac{3 \cdot 10^5}{2\pi \cdot 10^4 \cdot 10} \simeq 0.5 \text{ V}$$

- Partite da un segnale V_p molto minore di 0.5 V e cercate di capire per quale valore di V_p il segnale d'uscita risulti deformato/tagliato.
- Confrontate il valore trovato con quello che si ottiene dalla disuguaglianza, utilizzando il valore di S misurato nel punto precedente.

Misura del prodotto guadagno-banda passante

Costruire un amplificatore invertente e misurare l'andamento della risposta in funzione della frequenza per vari valori dell'amplificazione, costruendo il diagramma di Bode complessivo (vedi figura). Verificare che il prodotto (Amplificazione)x(Banda Passante) è costante. E' opportuno scegliere i vari valori di amplificazione (almeno tre, meglio quattro)



in modo oculato, cioè tale da consentirci di apprezzare bene questo comportamento in un intervallo più grande possibile di valori e con un congruo numero di misure in funzione della frequenza (senza però farne troppe nella regione in cui l'amplificazione è costante). Tenete sempre presente che le resistenze usate non devono essere troppo piccole, ne' troppo grandi.

Attenti allo slew rate se usate il LM358:

$$A \cdot V_p \leq \frac{S}{\omega}$$



LM358

$$V_p \leq \frac{S}{2\pi f \cdot A} = \frac{3 \cdot 10^5}{2\pi \cdot 10^6} \simeq 50 \text{ mV}$$

Consigli per la misura del prodotto GBW

- ❑ La massima tensione d'uscita che potete avere, in modulo, è uguale all'alimentazione (ad esempio 12 V), quindi tenetelo presente quando usate amplificazioni molto grandi
- ❑ Si consiglia di usare tre (o quattro) valori dell'amplificazione abbastanza distanti tra loro, ad esempio 4, 40, 100, 250 oppure 5, 20, 80, 200
- ❑ Ricordate che nel prodotto Guadagno per Banda Passante, il guadagno va preso esprimendo il suo valore in scala lineare e non in decibel.
- ❑ Anche se fate tre o quattro misure del GBW, poi dovete combinare le misure per dare un solo valore.

Alcune misure relative al LM358 di alcuni anni fa

Gruppo	GBW product (kHz)	Errore (kHz)
1	368	5
2	547	50
3	640	30
4	723	100
5	672	39
6	619318 (Hz)	12789 (Hz)
7	52 (db x kHz)	3
8	87	11

In genere sono stati usati dei valori di G troppo vicini tra loro

Errore troppo ottimista.

Questo gruppo non fa la media dei valori

Questo gruppo non fa la media dei valori

No comment sulle cifre significative

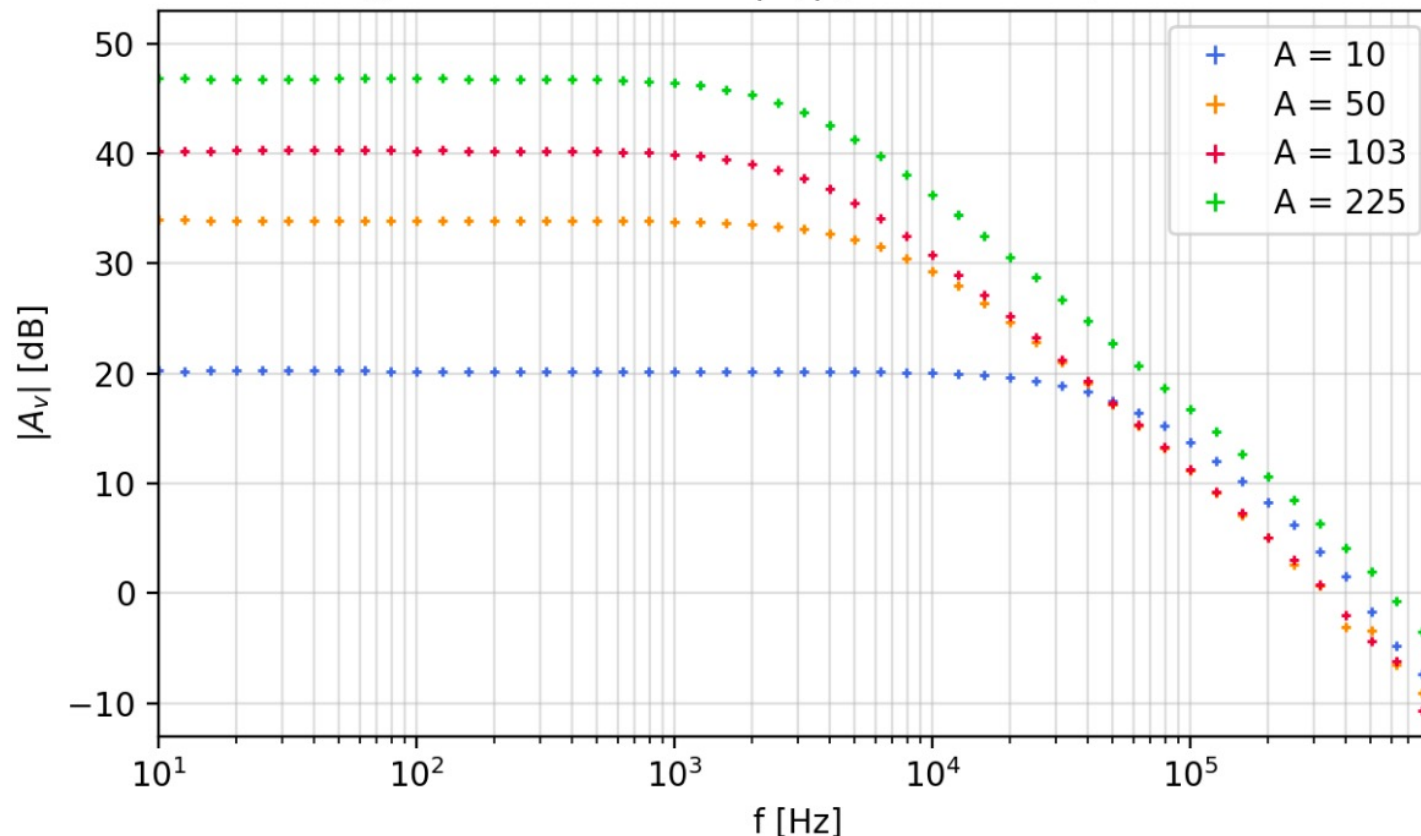
Usa i dB, non va bene

??? , comunque usa 4 valori di G tutti < 10

Alcuni grafici del GBW product

Diagramma di Bode fatto usando il generatore interno dell'oscilloscopio

Diagramma di Bode di $|A_V|$ per varie amplificazioni



LM358

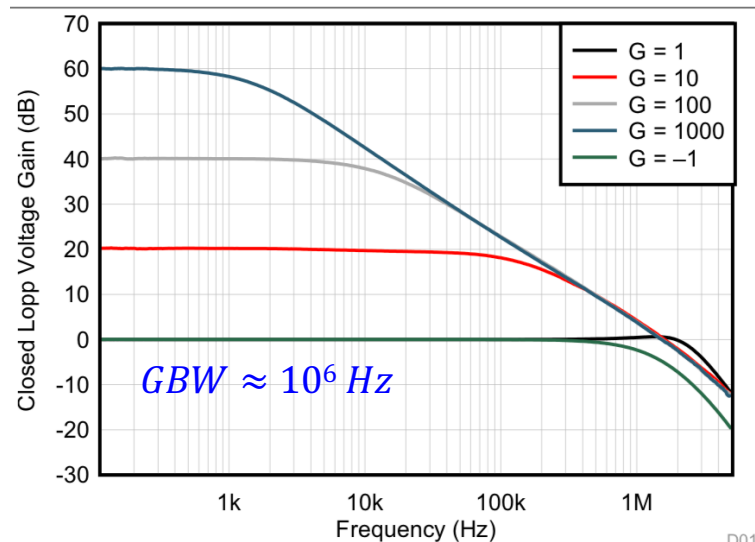
A_T [adim]	A_{mis} [adim]	f_T [kHz]	$A \times f_T$ [kHz]
10.3 ± 0.4	10.3 ± 0.2	54.6 ± 4.3	562 ± 34
50 ± 2	50.1 ± 0.7	7.1 ± 0.8	355 ± 21
103 ± 4	103 ± 2	3.6 ± 0.5	372 ± 22
225 ± 9	219 ± 5	3.1 ± 0.4	701 ± 42

Il grafico è bello, ma i risultati non tanto.
I GBWP non sono compatibili tra di loro.

Alcuni grafici del GBW product

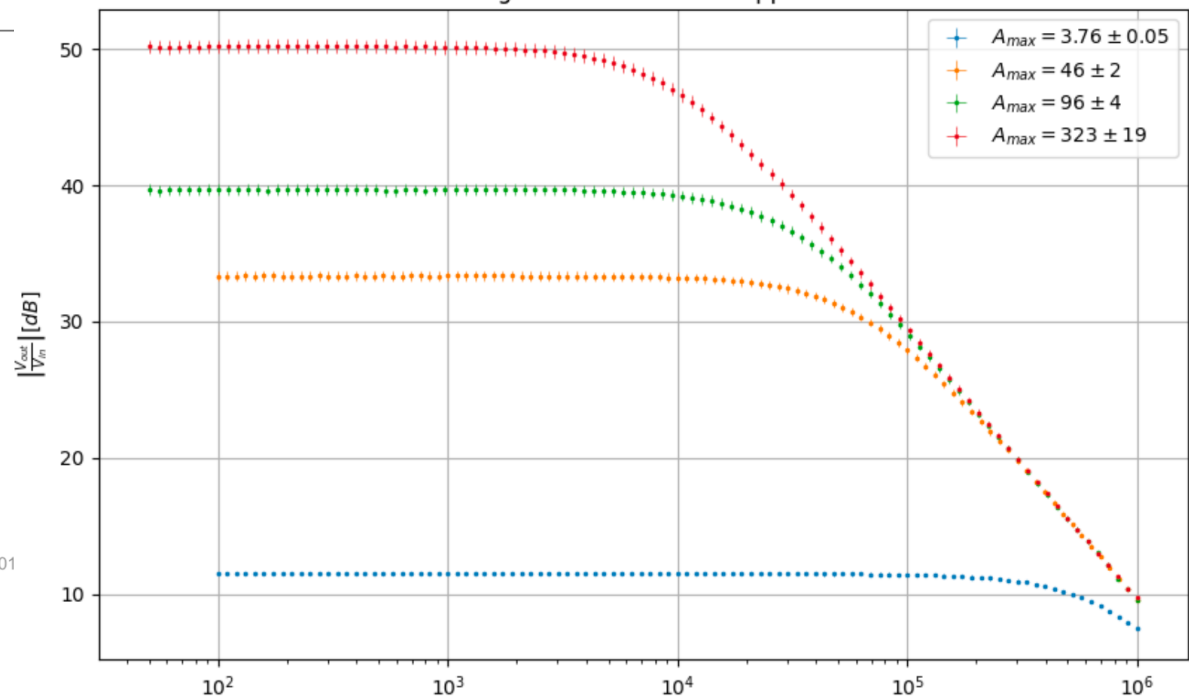
TL082

Diagrammi di Bode sovrapposti



from TL082 datasheet

Figure 6. Closed-Loop Gain vs Frequency



#Misura	A_{MAX}	f taglio [kHz]	GBW[kHz]
1	3.76 ± 0.05	807 ± 16	3030 ± 100
2	46 ± 2	63.3 ± 4.8	2900 ± 300
3	96 ± 4	30.6 ± 2.6	2900 ± 400
4	323 ± 19	9.2 ± 1.0	2980 ± 510

: Tabella riassuntiva delle misure effettuate.

$\overline{GBW}$ [kHz]
3020 ± 90

Tabella 18: Valore medio del GBW, tramite media pesata con l'incertezza.

Errori troppo grandi sulla frequenza di taglio

Errore sull'amplificazione in dB

$$A(dB) = 20 \log_{10} A$$

$$\Delta A(dB) = 20 \log_{10}(A + \Delta A) - 20 \log_{10} A = 20 \log_{10} \frac{A + \Delta A}{A} = 20 \log_{10} \left(1 + \frac{\Delta A}{A} \right)$$

$$\text{Esempio: } \frac{\Delta A}{A} = 1\% \Rightarrow \Delta A(dB) = 20 \log_{10}(1 + 0.01) = 0.086 \text{ dB}$$

$$\text{Esempio: } \frac{\Delta A}{A} = 5\% \Rightarrow \Delta A(dB) = 20 \log_{10}(1 + 0.05) = 0.424 \text{ dB}$$

$$\text{Esempio: } \frac{\Delta A}{A} = 10\% \Rightarrow \Delta A(dB) = 20 \log_{10}(1 + 0.1) = 0.828 \text{ dB}$$

$$\text{Formula inversa: } \frac{\Delta A}{A} = 10^{\frac{\Delta A(dB)}{20}} - 1$$

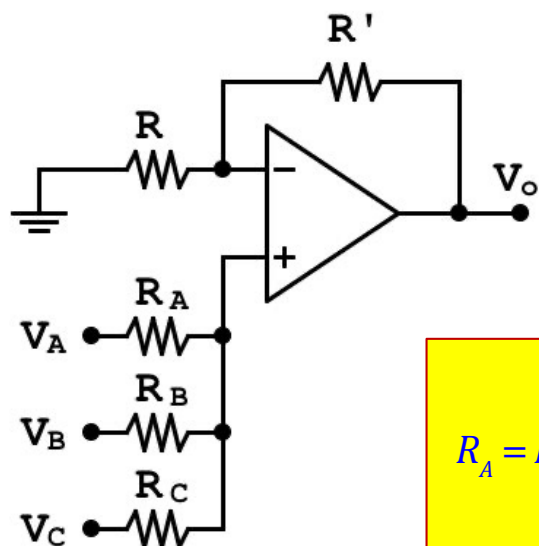
Se l'errore relativo sull'amplificazione è piccolo, si può sviluppare il logaritmo al primo ordine:

$$\Delta A(dB) = 20 \log_{10}(A + \Delta A) - 20 \log_{10} A = 20 \log_{10} A + 20 \frac{d(\log_{10} A)}{dA} \Delta A - 20 \log_{10} A = 20 \log_{10} e \cdot \frac{1}{A} \cdot \Delta A$$

$$\Delta A(dB) = 8.68 \cdot \frac{\Delta A}{A}$$

$$\text{Esempio: } \frac{\Delta A}{A} = 5\% \Rightarrow \Delta A(dB) = 8.68 \times 0.05 = 0.434 \text{ dB}$$

Sommatore non invertente a 3 ingressi



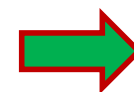
$$V_o = \frac{R' + R}{R} \cdot R_K \cdot \left[\frac{V_A}{R_A} + \frac{V_B}{R_B} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right]$$

$$V_{o_{max}} \leq V_{lim}$$

Scegliete

$$R_A = R_B = R_C = R_i = 1 \text{ k}\Omega \quad (\text{ad esempio})$$

$$R' = 2 \cdot R$$



$$V_o = \frac{3R}{R} \cdot \frac{R_i}{3} \cdot \frac{1}{R_i} \cdot (V_A + V_B + V_C)$$

1. Misurate separatamente l'amplificazione di ciascun canale mandando un segnale solo su un ingresso, cortocircuitando gli altri due a massa.
2. Mandate tre segnali continui sui tre ingressi (ottenuti con dei trimmer) e verificate che l'uscita sia la somma dei tre (potete/dovete anche usare uno o due segnali negativi)
3. Mandate due segnali sinusoidali su due ingressi (utilizzando i due generatori o i due canali del generatore nuovo), cortocircuitate il terzo ingresso a massa e verificate il fenomeno dei battimenti (le due frequenze devono essere abbastanza vicine tra loro). Misurate la frequenza del battimento e confrontatela con quello che vi aspettate.
4. Mandate un'onda quadra su un ingresso e un segnale sinusoidale di ampiezza piu' piccola e frequenza piu' grande su un altro ingresso (cortocircuitate sempre il terzo) e verificate sull'oscilloscopio cosa ottenete.

Non smontate il circuito alla fine dell'esperienza

Battimenti

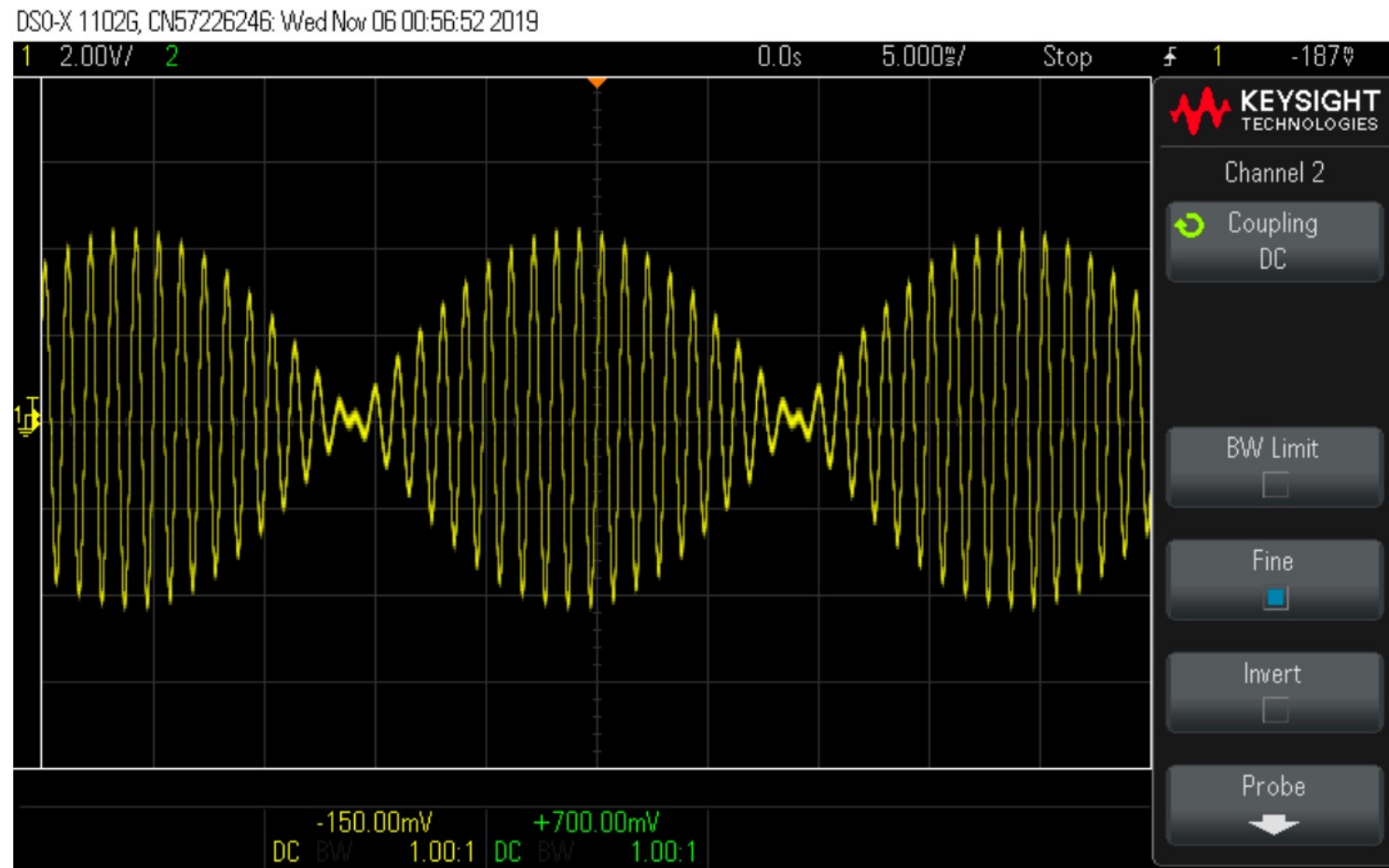


Figure 12: Fenomeno dei battimenti con sommatore a tre ingressi.
ampiezza $V_B = V_C = 2\text{ V}$; frequenze $f_B = 1\text{ kHz}$, $f_C = 950\text{ Hz}$.

Verificare che la frequenza dei battimenti sia di 50 Hz

Onda quadra più onda sinusoidale

- onda quadra $\rightarrow f_B = 1\text{ kHz}$, $V_B = 10\text{ V}$;
- onda sinusoidale $\rightarrow f_C = 10\text{ kHz}$, $V_C = 2\text{ V}$;

Tramite l'oscilloscopio osserviamo il segnale di uscita (figura (16)).

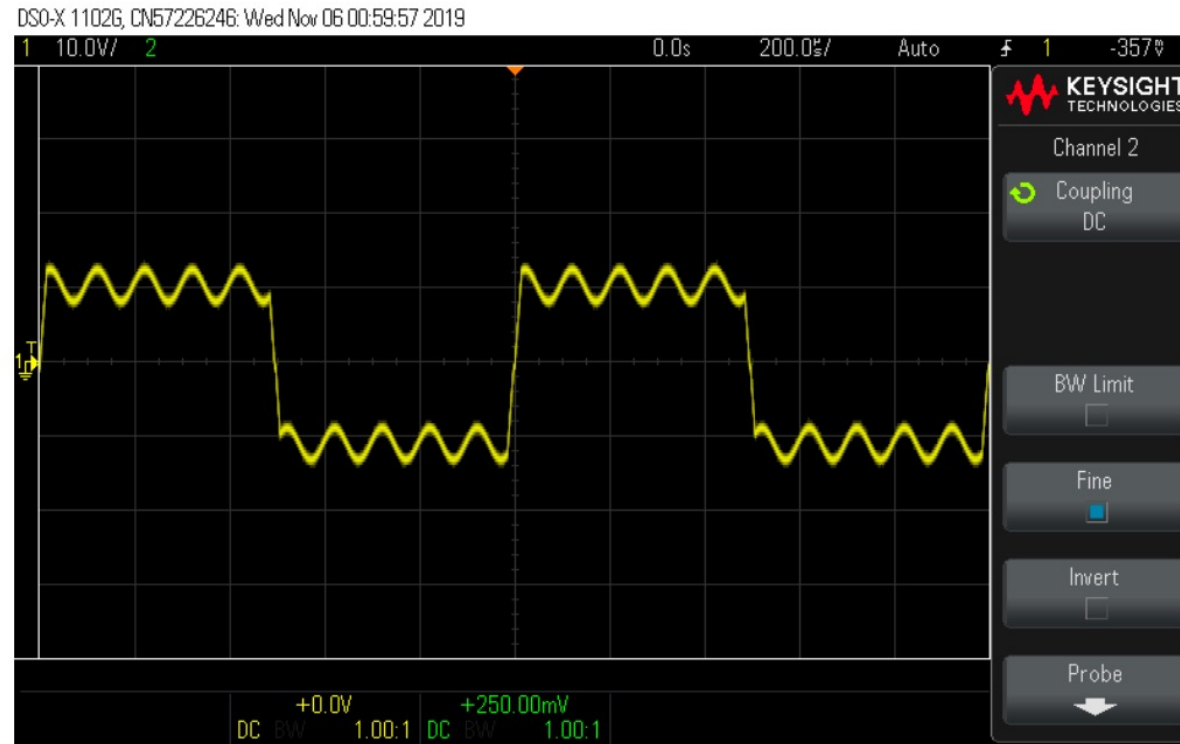
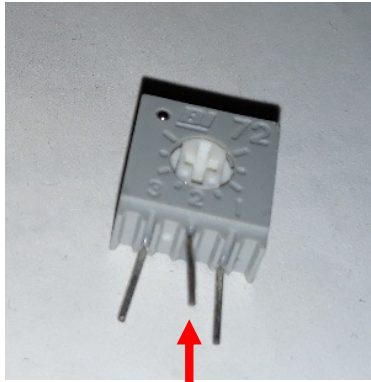


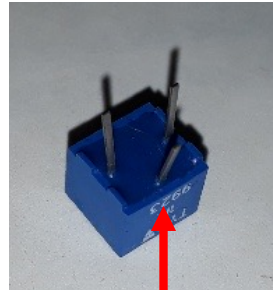
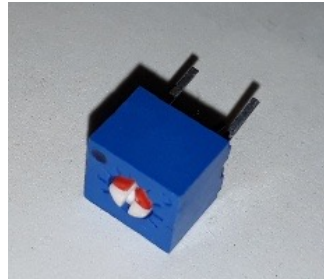
Figure 16: Segnale ottenuto come somma di onda quadra e onda sinusoidale. Poiché il periodo dell'onda quadra è molto più grande di quello della sinusoidale, su ciascun semiperiodo l'output si comporta come la somma di un segnale costante e un segnale sinusoidale: si osserva la stessa onda sinusoidale in ingresso, ma traslata verticalmente di una quantità pari all'ampiezza dell'onda quadra (si veda sezione 2.1). Il verso della traslazione dipende dal semiperiodo (positivo o negativo) dell'onda quadra.

Uso del trimmer

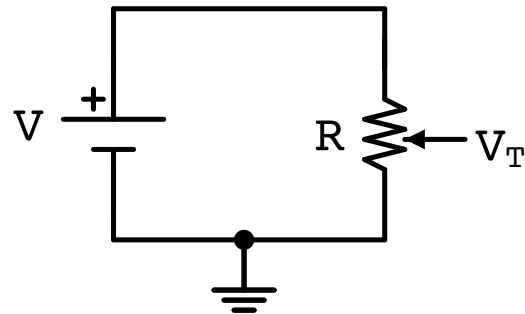
Il trimmer è un potenziometro. Si utilizza un cacciavite per variare il rapporto di partizione



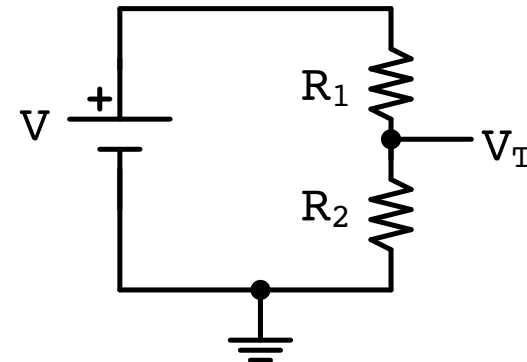
V_T



V_T



è equivalente a:



dove $R_1 + R_2 = R$

$$V_T = V \cdot \frac{R_2}{R}$$

Girando la vite con il cacciavite si cambia R_2 .



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Fine esercitazione 4