

10 La reazione			
10.1	La reazione	Reazione e stabilità di A	16'
10.2	Proprietà reazione	Altri effetti della reazione	6'
9 Amplif. operazionali			
9.1	L'ampl. operazionale	L'amplificatore operazionale	8'
9.3.1	Amplif. invertente	AO in configurazione invertente	12'
9.3.3	A. non inv. e inseg.	AO non invertente e inseguitore	6'
	Modulo E di Ambrosini	AO con limiti di banda	8'
9.10	AO a aliment. sing	AO a singola alimentazione	7'



La reazione

(16')

Nel linguaggio degli schemi a blocchi, quello che si scrive dentro ad un **blocco** è ciò per cui bisogna moltiplicare l'ingresso X per avere l'uscita (a regime) Y.

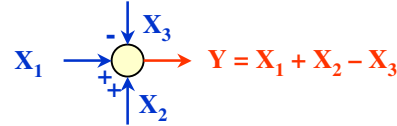
G(s) è la **funzione di trasferimento** e dipende da s (= σ+jω con C => 1/sC e L => sL) e quindi dalla frequenza (ω=2πf)

$$X(s) \rightarrow G(s) \rightarrow Y(s) = G(s) X(s)$$
$$y(t) = L^{-1}[G(s) X(s)]$$

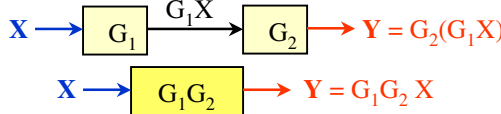
$$X(s) \rightarrow G(s) = K \rightarrow Y(s) = K X(s)$$
$$y(t) = K x(t)$$

Solo se il circuito è (o si può considerare) puramente resistivo la funzione di trasferimento è una cost K e y(t) = L^{-1}[K X(s)] = K L^{-1}[X(s)] = Kx(t)

Con un cerchio si rappresenta un **nodo sommatore**, che somma un ingresso o lo sottrae in base al segno scritto accanto alla freccia

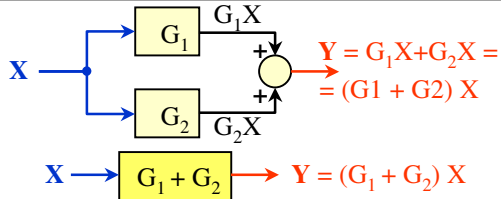


Se due blocchi sono **in serie** prima la X va moltiplicata per G1 e poi per G2, per cui equivalgono ad un blocco solo la cui G = G1G2



Se due blocchi sono **in parallelo** da quello sopra esce G1X e da quello sotto G2X, per cui l'uscita è G1X + G2X.

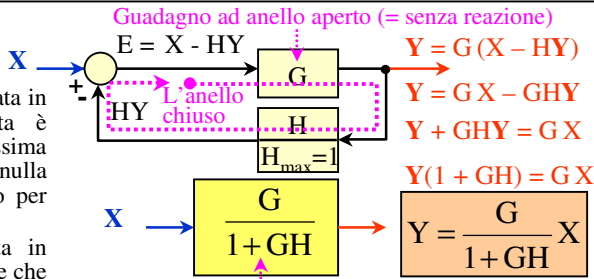
Mettendo in evidenza la X si vede che equivalgono ad un blocco solo la cui G = G1 + G2



Un **sistema ha una reazione (feedback)** se:

1) una parte dell'uscita Y è riportata in ingresso (se H=1 tutta l'uscita è riportata in ingresso e si ha la massima reazione, mentre se H=0 nulla dell'uscita è riportata in ingresso per cui non si ha nessuna reazione);

2) La parte dell'uscita riportata in ingresso (HY) influisce sul segnale che entra in G (che non è più X ma X-HY)

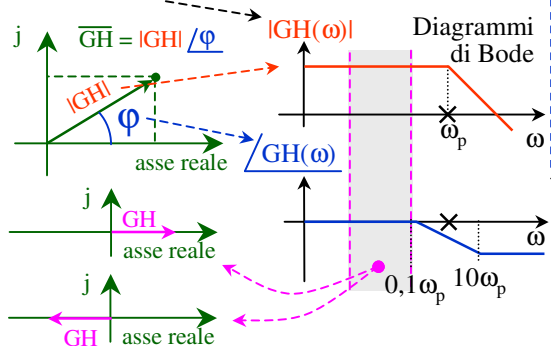


Guadagno ad anello chiuso (= con reazione)

Diag. di Bode di GH (stessa forma di quelli di G se H è resistivo)

GH si chiama **guadagno di anello** ed è un G(s)H(s) con segnali d'ingresso di forma qualsiasi e un G(jω)H(jω) con ingressi di forma sinusoidale, per cui è un **numero complesso** con un **modulo |GHI|** e una **fase φ**, entrambi variabili al variare di ω (=> diagrammi di Bode)

Solo in una zona di frequenze dove il comportamento è **resistivo** perché si possono trascurare i condensatori, **GH** diventa un **numero reale**, che può essere positivo (segnale che dopo un giro torna in fase) o negativo (segnale che dopo un giro torna sfasato di 180°)

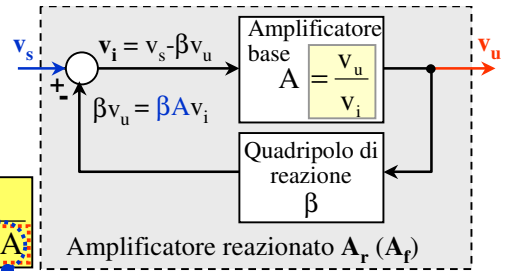


Quando ad essere reazionato è un amplificatore (che sopporta di tensione ma che potrebbe essere di corrente o misto, cioè entra una i ed esce una v o viceversa) invece di G (guadagno) si parla di A (amplificazione) e invece di rete H si parla di rete β

$$\frac{v_u}{v_s} = A_r$$

L'amplificazione Ar dell'amplif. reazionato vale

$$A_r = \frac{A}{1 + \beta A}$$



d (fattore di desensibilizzazione)

Guadagno d'anello

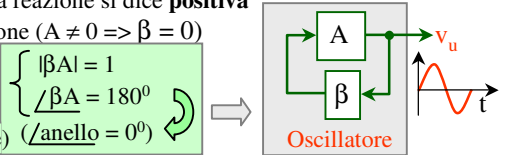
Se |1 + βA| > 1 allora Ar < A (⇔ v_i < v_s) e la reazione si dice **negativa (controreazione)**

Se |1 + βA| < 1 allora Ar > A (⇔ v_i > v_s) e la reazione si dice **positiva**

Se |1 + βA| = 1 allora Ar = A e non c'è reazione (A ≠ 0 => β = 0)

Se 1 + βA = 0 ovvero se βA = -1 ovvero se |βA| = 1 e ∠βA = 180° allora Ar = ∞ e può essere v_u ≠ 0 con v_s = 0

Condizioni di Barkausen (a regime) (∠anello = 0°)



Esercizio. Con Av = 100 e β = 0,09 vs = 10mV trovare βA, d, Ar, e classificare la reazione. Con vs = 10 mV trovare vu e vi

βA = 0,09*100 = 9 d = 1 + βA = 10

Ar = 100/d = 10 Reaz. **negativa** perché Ar = 10 < Av = 100

vu = Ar*vs = 10*10 = 100 mV βvu = 100*0,09 = 9 mV vi = vs - βvu = 10 - 9 = 1 mV

Effetti della reazione negativa (quella positiva ha effetti opposti)

1) La **variazione relativa del guadagno** con reazione (ΔAr/Ar) è **1+βA volte inferiore** della variazione relativa del guadagno senza reazione (ΔA/A)

$$\frac{dA_r}{A_r} = \frac{1}{d} \frac{dA}{A}$$

Es.: Av = 1000 ± 100 e 1+βA = 100. **Trov. Ar, ΔA/A e ΔAr/Ar**

Ar = 1000/100 = 10 ΔA/A = 100/1000 = 0,1 = 10% ΔAr/Ar = 10%/100 = 0,1%

Se βA >> 1 $A_r = \frac{A}{1 + \beta A} \approx \frac{A}{\beta A} = \frac{1}{\beta}$ e **qualunque variazione di A non fa variare Ar, se β non varia** (ad es. perché fatta con resistori di precisione a basso coefficiente di temperatura)

Es.: AOLmin = 50 000, AOLMAX = 300 000 e Ar = 100. **Cosa ci si può aspettare per ΔA/Ar?**

Per avere Ar = 100 serve un β = 1/Ar = 0,01 Se Ar dipende solo da β allora ΔAr/Ar = 0/Ar = 0

Usando la formula ΔAr/Ar = (ΔA/A) / d avremmo invece: AOLmedia = 350 000 / 2 = 175 000

ΔAOL = 175 000 - 50 000 (= 300 000 - 175 000) = 125 000

=> ΔAOL/AOL = 125 000 / 175 000 = 71% => ΔAr/Ar = 71% / (1 + βA) = 71% / 1750 = 0,04%

2) La **distorsione** (forma di Vu ≠ forma di Vingresso) Dr introdotta da Ar è anche essa **1+βA = d volte inferiore** rispetto alla distorsione D introdotta da A non reazionato

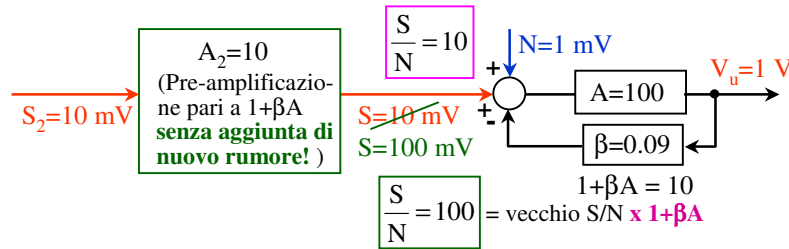
$$D_r = \frac{D}{d}$$



Altri effetti della reazione

(6'')

3) Il **rapporto segnale/rumore (S/N)** diventa **più grande** (quindi **migliore**) di $1+\beta A$ in presenza di reazione negativa perché questa riduce il guadagno di $1+\beta A$ costringendo ad aumentare il segnale di $1+\beta A$ se si vuole avere la stessa uscita



Reazione **parallelo**

$$R_{ir} = \frac{R_i}{d}$$

$$R_{ir} = d \cdot R_i$$

Reazione **serie**

4) La reazione negativa può sia **diminuire** sia **aumentare** la **resistenza d'ingresso** di $d = 1+\beta A$

e anche la **resistenza di uscita**

Reazione **di tensione**

$$R_{ur} = \frac{R_u}{d}$$

$$R_{ur} = d \cdot R_u$$

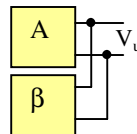
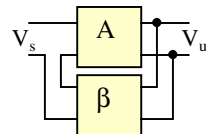
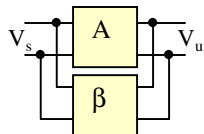
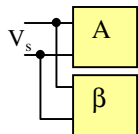
Reazione **di corrente**

e due tipi di reazione in ingresso

Ci sono due tipi di reazione in uscita:

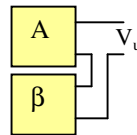
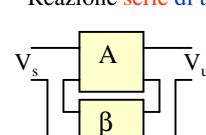
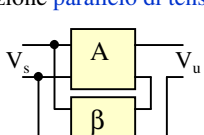
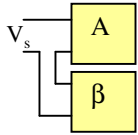
Reazione **parallelo**

Reazione **di tensione**



Reazione **parallelo di tensione**

Reazione **serie di tensione**



Reazione **serie**

Reazione **parallelo di corrente**

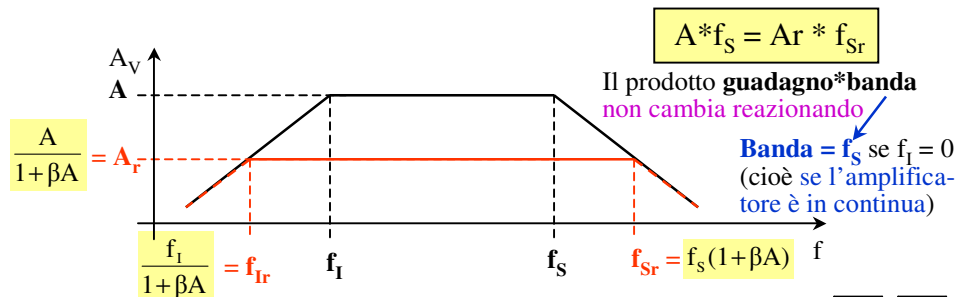
Reazione **serie di corrente**

Reazione **di corrente**

5) La reazione negativa riduce l'amplificazione ma **allarga la banda**.

In presenza di **un solo polo** alle basse frequenze (nel qual caso esso coincide con f_I) $f_{Ir} = f_I / d$

In presenza di **un solo polo** alle alte frequenze (nel qual caso esso coincide con f_S) $f_{Sr} = f_S \cdot d$



6) La reazione negativa ha molti pregi e un difetto solo, però grave: **può rendere instabile un amplificatore che prima di essere reazionato era stabile**.

Un amplificatore si dice **instabile** se il segnale fornito in uscita non va a zero (prima o poi, linearmente o oscillando intorno allo zero) quando mettiamo a zero il segnale d'ingresso.

Per ora vi basti sapere che questa instabilità (ovvero la generazione di un segnale in uscita senza un segnale d'ingresso) **non può succedere a causa della reazione**:

- 1) se la fase su un giro completo non è esattamente 0 (ovvero se la fase βA non è di 180° perché poi il sommatore ci aggiunge altri 180° portando la fase sul giro a zero).
- 2) se in presenza di una fase sul giro $= 0$ non succede **anche** che il modulo di βA non sia maggiore di 1

In conclusione un amplificatore **non diventa instabile per colpa della reazione** se non si realizzano insieme queste due condizioni

$$\left\{ \begin{array}{l} \angle \text{anello} = 0^\circ \text{ oppure } \angle \beta A = 180^\circ \\ |\beta A| > 1 \end{array} \right.$$

Condizioni di Barkausen per l'innescio



L'amplificatore operazionale

(8')

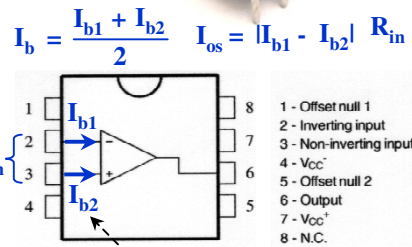
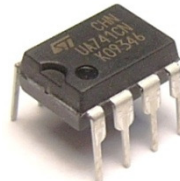
Un **amplificatore operazionale (AO)** è:

- un **integrato** (spesso usato per somme, moltiplicazioni, integrazioni,...)
- che contiene un **amplificatore a più stadi**
- che **generalmente** richiede una **alimentazione duale** (due tensioni uguali ed opposte), di regola con valori **tra 5 e 15V**

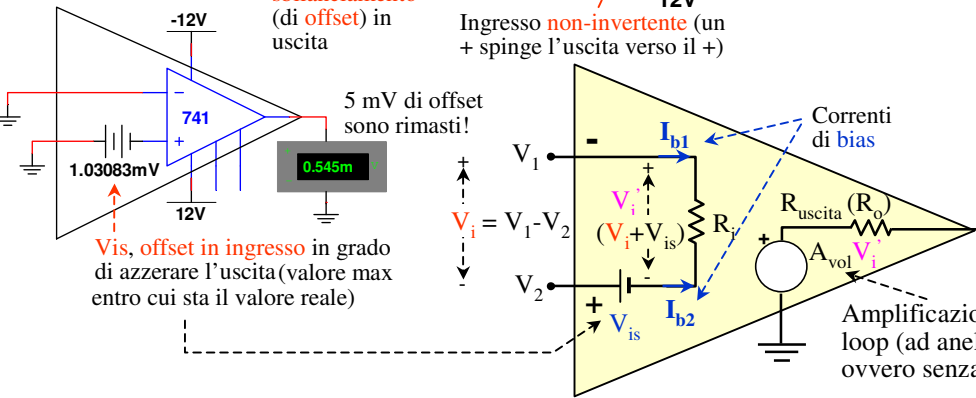
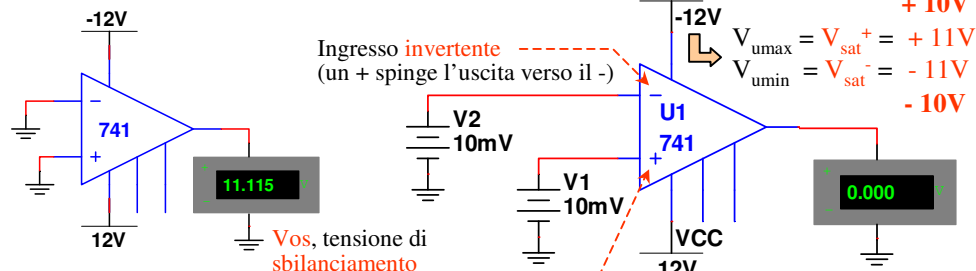
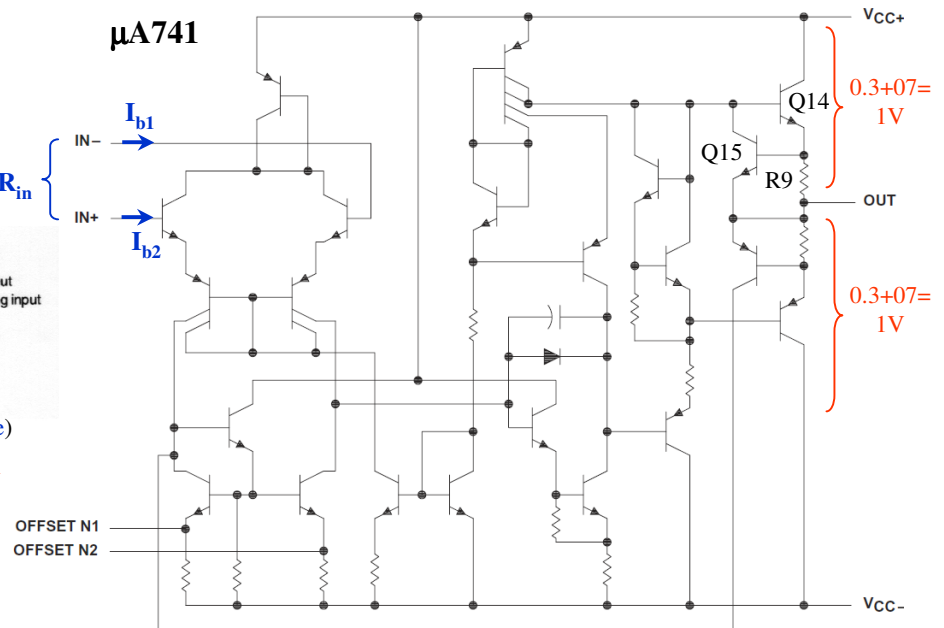
[**Vu** può variare da $+(V_{alim}^+ - 1 \div 2V)$ a $-(V_{alim}^- + 1 \div 2V)$]

- L'amplificatore è in **continua** (= può amplificare anche la continua non essendoci nessun condensatore in serie)

- ed è un **amplificatore differenziale** (ovvero ha due ingressi che permettono di inserire due tensioni di segnale V1 - V2 e una tensione di uscita proporzionale alla differenza V1-V2)

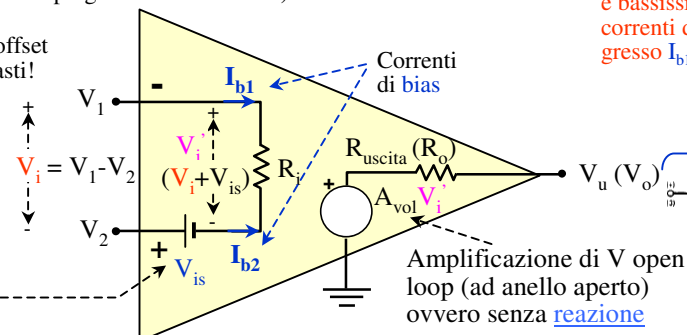
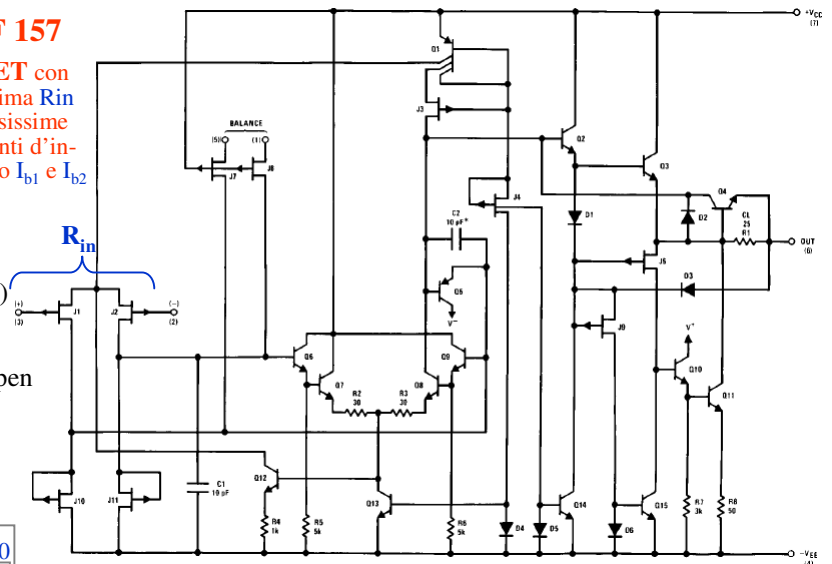


μA741



LF 157

BIFET con altissima Rin e bassissime correnti d'ingresso I_{b1} e I_{b2}



AO ideale	$R_i = \infty$	$R_o = 0$	$A_{vol} = \infty$
μA741	$R_i = 2 M\Omega$	$R_o = 75 \Omega$	$A_{vol} = 200\ 000$ $A_{volmin} = 20\ 000$
LF157	$R_i = 1000 G\Omega$	$R_o = 0.1 \div 10 \Omega$	$A_{vol} = 200\ 000$

Ibmedia tip = 80nA Vis tip = 1 mV

Gli AO a **CMOS** consentono basse alimentazioni e maggiore **dinamica** (escursione della tensione) di uscita

La grossa variabilità del guadagno non è un problema quando l'operazionale è usato come **comparatore**.

È invece inaccettabile quando si vuol fare un amplificatore, ma il problema viene superato con la **reazione negativa** al prezzo di una diminuzione del guadagno, che viene fatto grande proprio perché poi possa essere sacrificato per ottenere guadagni stabili, ma anche per ottenere una Ruscita molto minore di quella dell'operazionale e se serve una Rin ingresso molto maggiore

AO (in configurazione) invertente (12')

Con l'AO si possono fare tre tipi di amplificatori, due che non usano l'ingresso differenziale avendo un solo segnale d'ingresso V_s e quindi mettono a massa il secondo ingresso (l'AO **invertente** con V_s sul - e il + a massa e l'AO **non invertente** con V_s sul + e il - a massa) e uno (l'AO **differenziale**) con due ingressi V_{s1} e V_{s2}

Fare i conti trascurando (= considerando 0) i_i e v_i (attenz: se l'uscita **non** è saturata!)

$i^- = i^+ = 0$ e $v_i = 0$ per $-V_{sat} < v_u < V_{sat}$

viene riassunto dicendo che si sta considerando esistente un **cortocircuito virtuale** tra i due ingressi dell'AO

Usando il cortocircuito virtuale dimostrare che:

$$v_u = -\frac{R_2}{R_1} v_s \quad A_v = \frac{v_u}{v_s} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Usare il cortocircuito virtuale significa considerare $v_i = 0$ (per cui il - è a massa come tensione) e $i^- = 0$

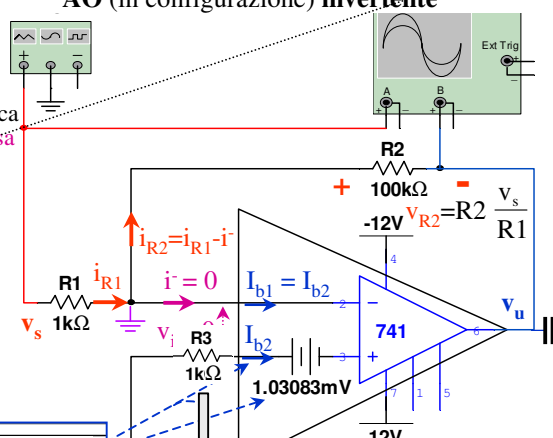
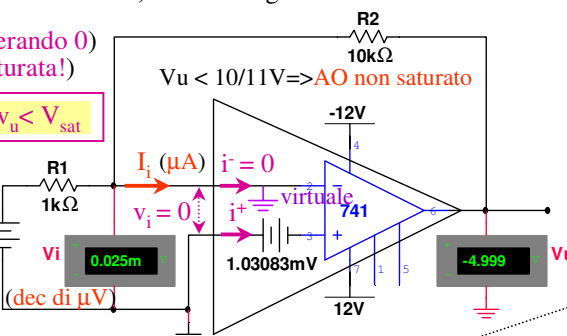
$$i_{R1} = \frac{v_s - v_i}{R_1} = \frac{v_s}{R_1} = i_{R2}$$

$$v_{R2} = R_2 i_{R2} = R_2 \frac{v_s}{R_1}$$

$$v_u = -v_{R2} = -R_2 \frac{v_s}{R_1}$$

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{100k}{1k} = -100$$

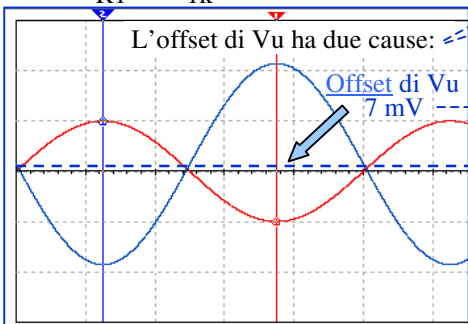
AO (in configurazione) invertente



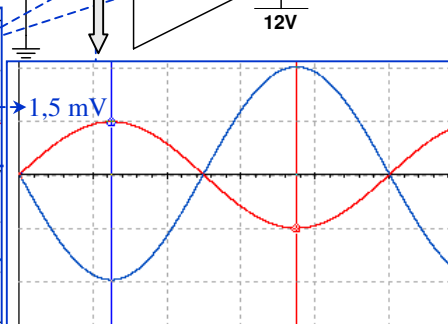
L'offset di V_u ha due cause:

Offset di V_u 7 mV

1,5 mV



Time	Channel_A	Channel_B
T1	75.000 ms	-1000.000 uV
T2	25.000 ms	1.000 mV
T2-T1	-50.000 ms	2.000 mV



Time	Channel_A	Channel_B
T1	75.000 ms	-1000.000 uV
T2	25.000 ms	1.000 mV
T2-T1	-50.000 ms	2.000 mV

L'amplificazione di tensione è importante, ma è altrettanto importante la R_i e la R_u . Quale è la R_i e la R_u dell'AO invertente qui sotto?

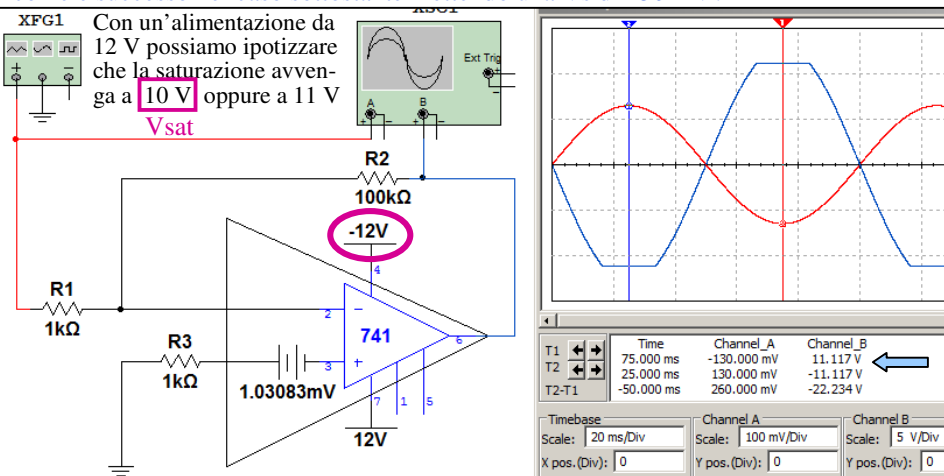
$$R_i = \frac{v_s}{i_s} = \frac{v_s}{\frac{v_s}{R_1}} = R_1 \quad R'_i = 0$$

Evidentemente il **tipo di reazione** in ingresso è quello che riduce la resistenza di ingresso di $1+\beta A$. Poiché sappiamo che il $\mu A741$ guadagna 200 000 e **reazionandolo** lo abbiamo portato a guadagnare 10, allora $1+\beta A = 20000$. La R_i del $\mu A741$ senza reazione vale **2 MΩ**, che diviso per 20 000 fa 100 Ω (un valore che si può trascurare rispetto a $R_1=1k\Omega$)

Evidentemente il **tipo di reazione** in uscita è quello che riduce la resistenza di uscita di $1+\beta A$. La R_i del $\mu A741$ senza reazione vale **75 Ω**, che diviso per 20 000 fa 3,7 mΩ, un valore decisamente trascurabile che possiamo tranquillamente considerare 0

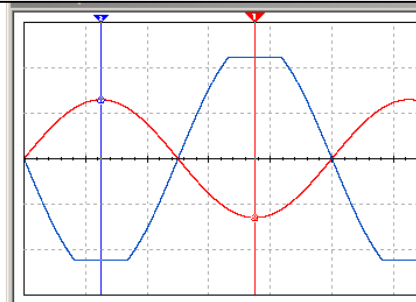
Scoperta l'amplificazione di tensione e le resistenze di ingresso e di uscita, quello che resta da fare è di capire i **limiti da non superare** sia sulla tensione che sulla corrente

Quanta corrente entra o esce dal piedino di uscita dell'operazionale a vuoto e a carico? **Quale valore non deve superare V_s per evitare che la tensione di uscita risulti tagliata come è successo nel caso sottostante mettendo una V_s di 130 mV?**



$$V_{u \text{ MAX}} = V_{s \text{ MAX}} \frac{R_2}{R_1} = 100 \cdot V_{s \text{ MAX}} = V_{sat} \rightarrow V_{s \text{ MAX}} = \frac{V_{sat}}{100} = \frac{10}{100} = 0,1V = 100mV$$

Di regola gli amplificatori operazionali sono in grado di dare o di assorbire **5-10 mA** in uscita (e se si cortocircuita l'uscita scatta una protezione che limita la corrente, di solito a **25 mA**, per evitare che si danneggi)



Time	Channel_A	Channel_B
T1	75.000 ms	-130.000 mV
T2	25.000 ms	130.000 mV
T2-T1	-50.000 ms	260.000 mV

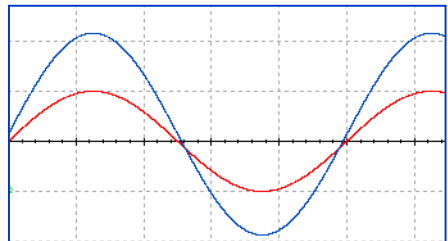


AO non invertente e inseguitore di tensione (6')

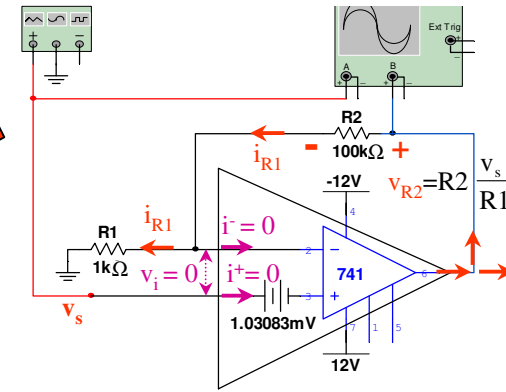
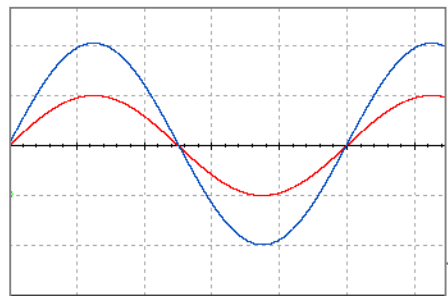
Quando si vuole una R_i molto elevata e/o non si vuole che V_u sia invertita rispetto a V_s si usa l'AO in **configurazione non invertente**.

Usando il corto circuito virtuale ($V_i = 0$ e $i^- = i^+ = 0$) dimostrare che:

$$v_u = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)v_s \quad A_v = \frac{v_u}{v_s} = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

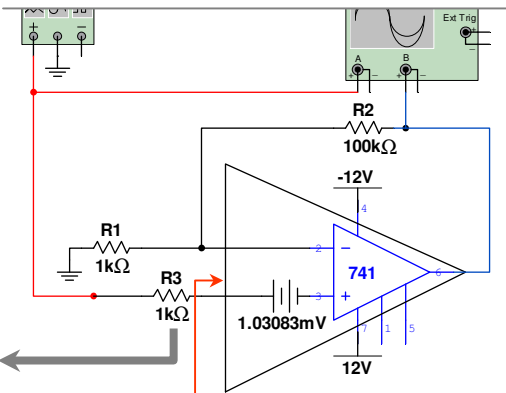


	Time	Channel_A	Channel_B
1	0.000 s	0.000 V	7.253 mV
2	0.000 s	0.000 V	7.253 mV
2-T1	0.000 s	0.000 V	0.000 V



$$i_{R1} = \frac{v_s - v_i}{R_1} = \frac{v_s}{R_1}$$

$$v_u = v_{R2} + v_i + v_s = R_2 \frac{v_s}{R_1} + 0 + v_s = v_s \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)$$



$$1 + \beta A = \frac{A_{vol}}{A_v} = \frac{200000}{100} = 2000$$

$$R_{ir} = R_i (1 + \beta A) = 2M * 2000 = 4 G\Omega$$

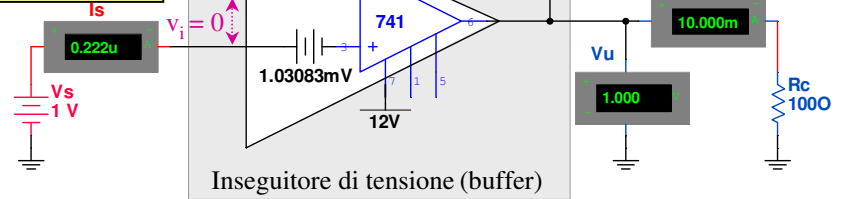
La differenza importante è che l'AO **invertente** ha una reazione in ingresso di tipo parallelo che **riduce** la R_i di $1 + \beta A$ mentre l'AO **non invertente** ha una reazione in ingresso di tipo serie che **aumenta** la R_i di $1 + \beta A$.

Entrambi gli amplificatori hanno una reazione in uscita di tensione che **riduce** la resistenza di uscita R_u di $1 + \beta A$, che già era piccola (75Ω) e con la reazione diventa $R_u = 0$

(situazione desiderabile perché inserendo il carico la V_u non diminuisce per nulla rispetto al valore che aveva a vuoto)

Retroazione unitaria
(retroazione massima con A_v minima e infatti $A_v = 1$)
perché $V_u = V^- = V^+ = V_s$

$$A_i = \frac{i_c}{i_s} = \frac{10m}{0,2\mu} = 50000$$



L'inseguitore di tensione è usato come buffer, ovvero come separatore tra il carico e V_s , tutte le volte (e capita molto spesso) che il generatore V_s non è in grado di dare la corrente che il carico vorrebbe assorbire.

Qui la corrente al carico la dà l'O e V_s si limita a "ordinare" l'erogazione di tale corrente.

Come tensione sembra che il circuito dell'inseguitore si riduca ad un filo visto che $V_u = V_s$ ma dentro non c'è affatto un filo visto che al carico viene fornita una corrente senza assorbire corrente da V_s

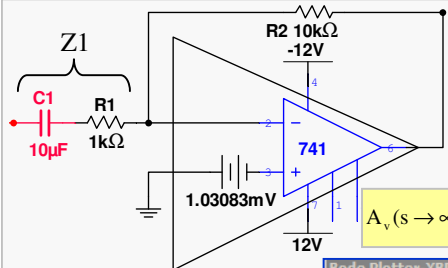


AO con limiti di banda

(8')

Per amplificare il meno possibile segnali di disturbo è necessario che il guadagno A_v diminuisca sensibilmente (ad es. di 3 dB che corrisponde ad una riduzione di $\sqrt{2}$ volte ovvero del 30%) sotto e sopra determinate frequenze dette **frequenze di taglio**.

1) Introduzione di una **frequenza di taglio inferiore** (f_{ti})



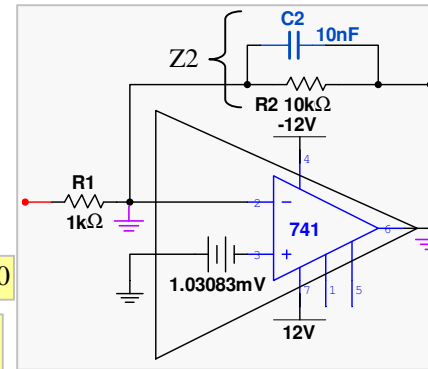
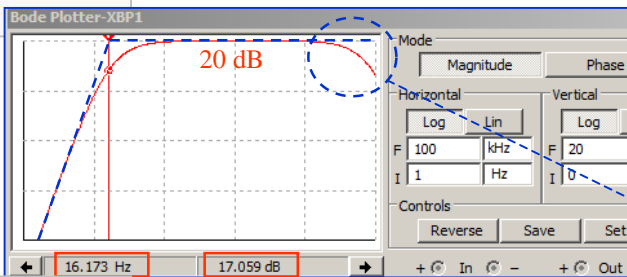
$$A_v(s) = \frac{-R2}{Z1(s)} = \frac{-R2}{R1 + \frac{1}{sC1}} = \frac{-R2}{sR1C1 + 1}$$

$$A_v(s) = \frac{-sR2C1}{sR1C1 + 1} = 0 \rightarrow s_0 = 0 \rightarrow \omega_0 = 0$$

$$A_v(s \rightarrow \infty) = \frac{-R2}{R1} \quad s_p = -\frac{1}{R1C1} \rightarrow \omega_p = |s_p| = \frac{1}{R1C1}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi R1C1} = 15.9Hz$$

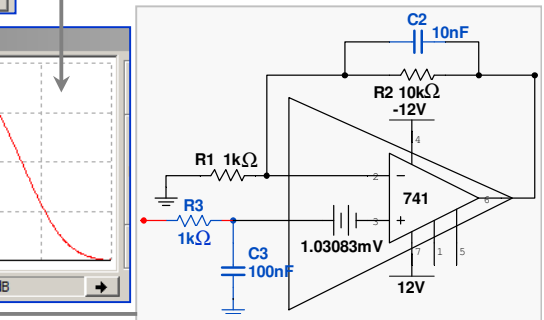
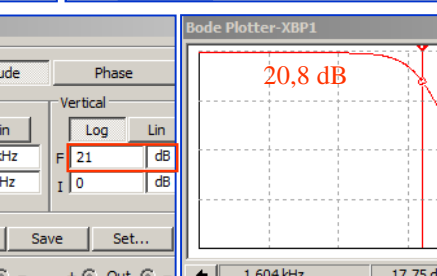
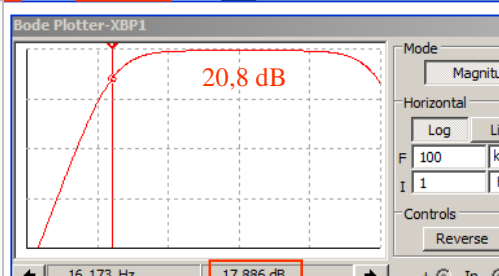
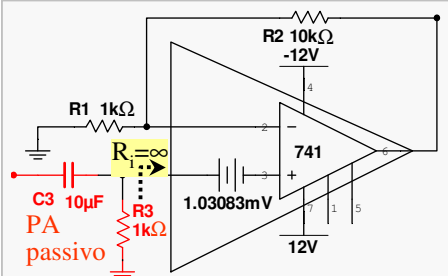
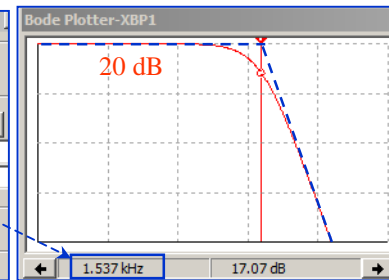
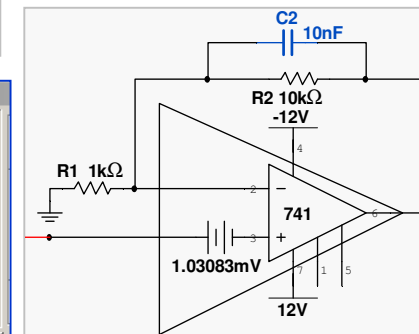
È un **passa alto (PA)** con f di taglio a 16 Hz (un **PA attivo** visto che **guadagna 10** nella banda che fa passare e **non 1** come sarebbe in un **PA passivo**)



$$A_v(s) = \frac{-Z2(s)}{R1} = \frac{-1}{R1} \frac{1}{\frac{1}{R2} + sC2} = \frac{-1}{R1 \left(\frac{1 + sR2C2}{R2} \right)}$$

$$A_v(s) = \frac{-R2}{R1(1 + sR2C2)} \quad A_v(s \rightarrow 0) = \frac{-R2}{R1}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi R2C2} = 1.59kHz$$

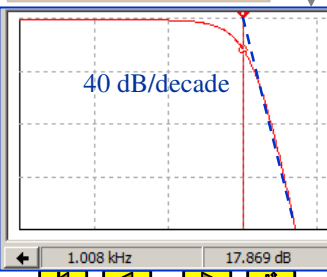
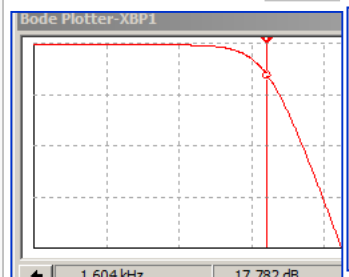
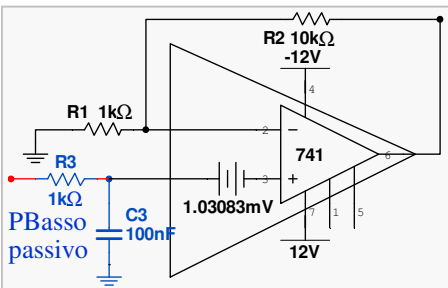


$$A_v(s) = \frac{R3}{R3 + \frac{1}{sC3}} \left(\frac{R2}{R1} + 1 \right) = \frac{R3}{sR3C3 + 1} \left(\frac{R2}{R1} + 1 \right) = \frac{sR3C3}{sR3C3 + 1} \left(\frac{R2}{R1} + 1 \right)$$

$$A_v(s \rightarrow \infty) = \frac{R2}{R1} + 1$$

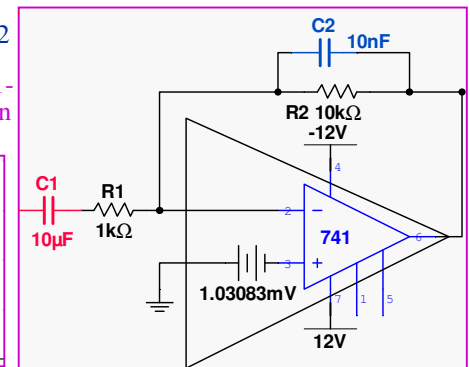
$$f_p = \frac{1}{2\pi R3C3} = 15.9Hz$$

2) Introduzione di una **frequenza di taglio superiore** (f_{ts})



Inserendo contemporaneamente il condensatore C2 e il filtro PA passivo R3-C3 regolato sulla stessa f_p , si ha un **PA attivo di ordine 2**

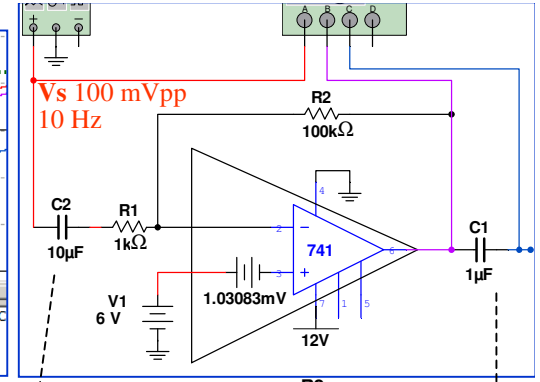
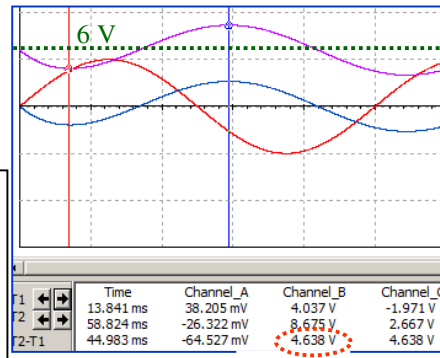
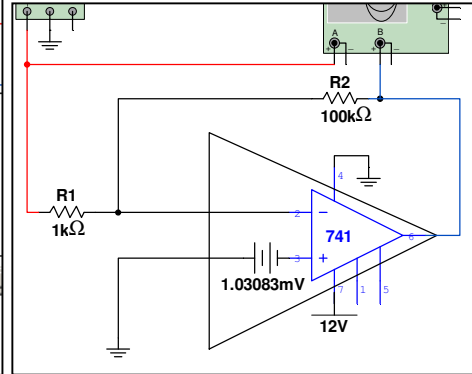
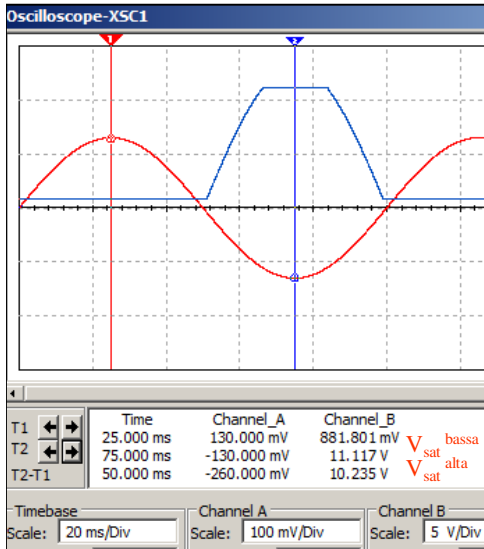
Usando insieme il **PA C1-R1** e il **PB C2-R2** si ha un **passa banda attivo**



AO a singola alimentazione (7)

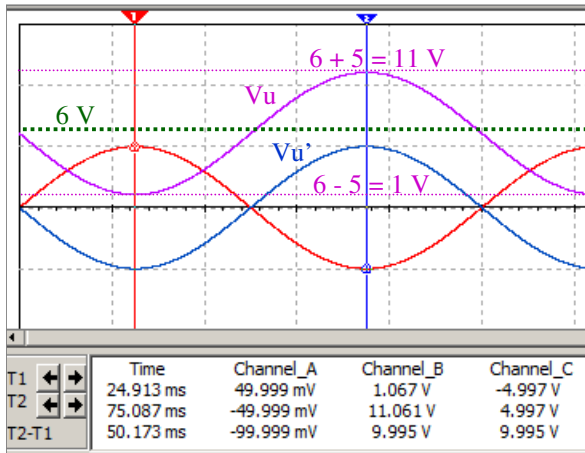
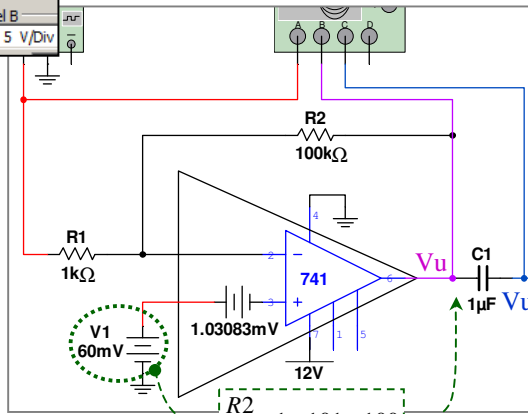
(7)

Se non alimento a $\pm 12V$ ma a $+12V$ e $0V$ (connettendo a massa il piedino V^-) l'uscita non potrà variare tra $\pm 11V$ ma varierà tra $+11V$ e $+1V$

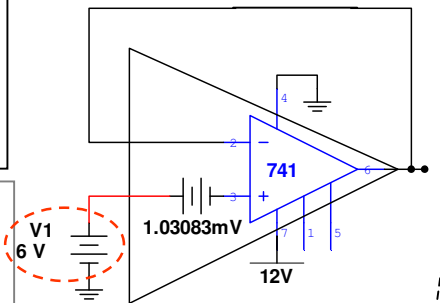
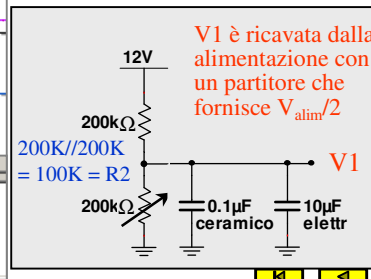


A farne le spese è la parte del segnale che dava una V_u negativa (impossibile da ottenere senza l'alimentaz. negativa).

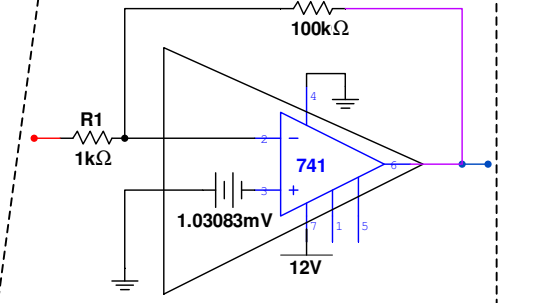
La soluzione è aggiungere una **continua di 6 V in uscita**, con la semionda negativa di V_s che fa salire V_u fino a $11V$ e quella positiva che fa scendere V_u fino a $1V$, prelevando poi l'uscita V_u' attraverso un $C1$ che toglie la continua.



Variando A_v bisogna variare la $V1$ per avere sempre 6 V continui in uscita. Per rendere indipendente da A_v la $V1$ necessaria per dare 6 V in uscita aggiungiamo un $C2$ in ingr.



Circuito in continua (inseguitore)



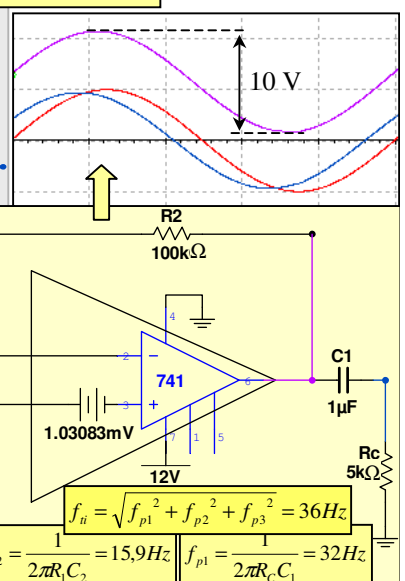
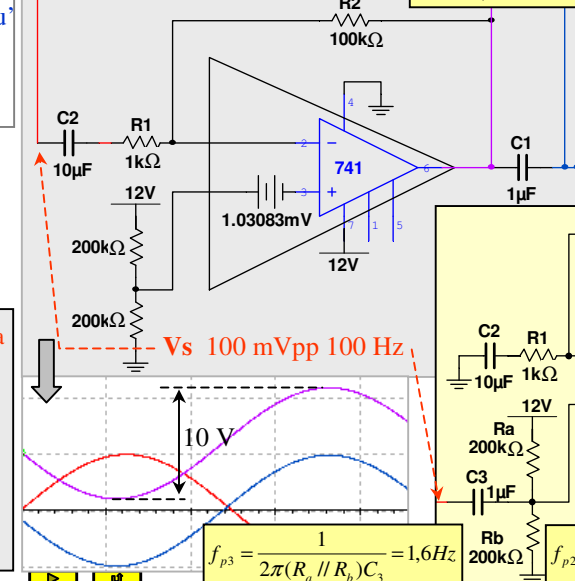
Circuito per le variazioni (AO inv.)

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_2} = \frac{1}{6.28 \cdot 10m} = 15,9Hz$$

$$f_{ii}^2 = f_{p1}^2 + f_{p2}^2$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi R_{carico} C1} = \frac{1}{\infty} = 0$$

$$f_{ii} = \sqrt{f_{p1}^2 + f_{p2}^2} = 15,9Hz$$



$$f_{p3} = \frac{1}{2\pi (R_a // R_b) C_3} = 1,6Hz$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi R_1 C_2} = 15,9Hz$$

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi R_c C_1} = 32Hz$$

$$f_{ii} = \sqrt{f_{p1}^2 + f_{p2}^2 + f_{p3}^2} = 36Hz$$