

# Chương 3: Xử lý tín hiệu đo

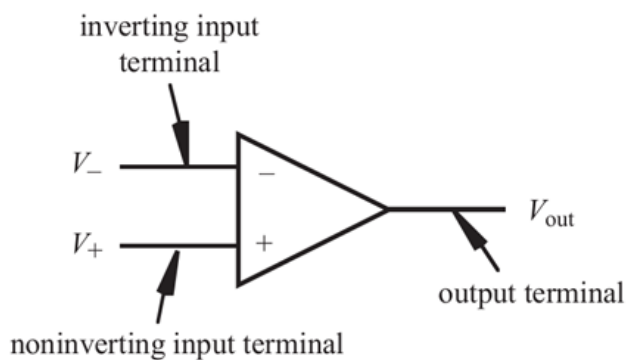
## 3.1) Mở đầu

- Tín hiệu analog từ cảm biến thường nhỏ, chứa nhiễu, chứa điện áp lệch DC (offset), ... trong khi tín hiệu vào những bộ chuyển đổi ADC tầm volt. Do đó, tín hiệu từ cảm biến cần được xử lý (khuếch đại, lọc nhiễu, khử offset,...) trước khi đưa vào ADC.
- Signal conditioning: xử lý tín hiệu từ cảm biến, gia công tín hiệu.

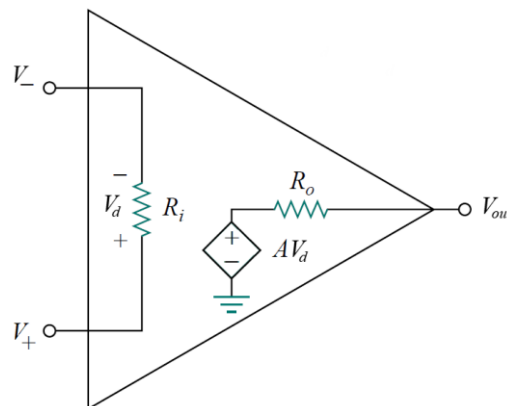
## 3.2) Bộ khuếch đại thuật toán (Op-Amp)

### 3.2.1) Giới thiệu Op-amp

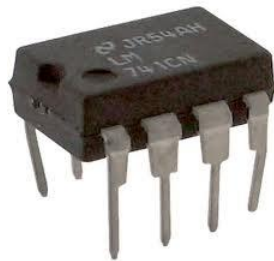
- Op-Amp (Operational Amplifier) là mạch tích hợp (IC) có ngõ vào vi sai, hệ số khuếch đại rất lớn, thực hiện chức năng khuếch đại tín hiệu.
- Ký hiệu:



Ký hiệu

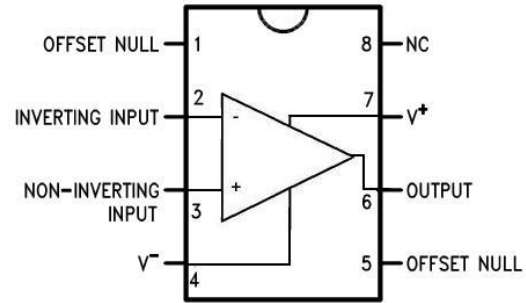


Mạch tương đương



Op-amp LM741

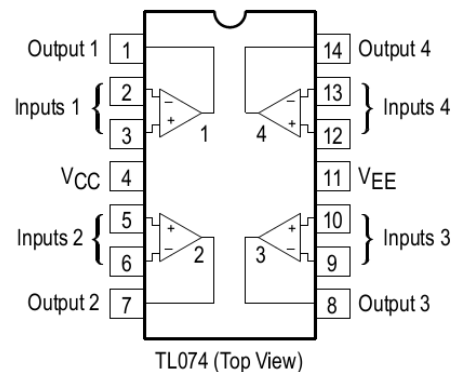
LM741 Pinout Diagram



Sơ đồ chân LM741



Op-amp TL074



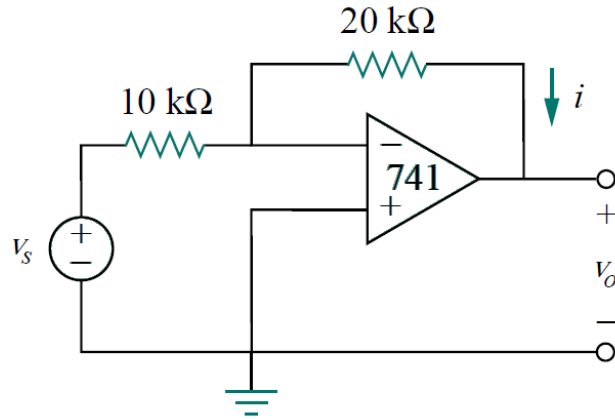
TL074 (Top View)

Sơ đồ chân TL074

- Thông tin về vi mạch (thông số kỹ thuật, sơ đồ chân, kiểu vỏ, ...) được ghi trong datasheet của vi mạch (search trên internet với từ khóa gồm mã vi mạch + “datasheet”).

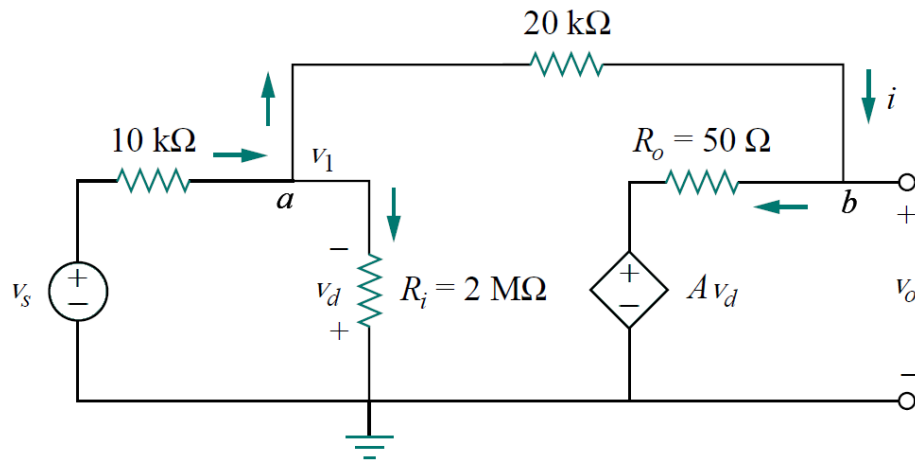
**VD:** Cho mạch điện như hình dưới. Op-amp LM741 có hệ số khuếch đại  $2 \times 10^5$ , trở kháng ngõ vào  $2M\Omega$ , trở kháng ngõ ra  $50\Omega$ .

- Xác định  $v_o/v_s$ .
- Xác định  $i$  khi  $v_s = 2V$ .



Giải:

Mạch tương đương:



Áp dụng định luật Kirchhoff về dòng tại nút a:

$$\begin{aligned}\frac{v_s - v_a}{10 \times 10^3} &= \frac{v_a}{2 \times 10^6} + \frac{v_a - v_b}{20 \times 10^3} \\ \Rightarrow 200v_s &= 301v_a - 100v_b \\ \Rightarrow 2v_s &\approx 3v_a - v_b \quad (1)\end{aligned}$$

Tại nút b:

$$\begin{aligned}\frac{v_a - v_b}{20 \times 10^3} &= \frac{v_b - Av_d}{50} = \frac{v_b - 2 \times 10^5 \times (-v_a)}{50} \\ \Rightarrow v_a - v_b &= 400(v_b + 200000v_a) \quad (2)\end{aligned}$$

Rút  $v_a$  từ (1) thế vào (2), để ý rằng  $v_b = v_o$ , ta có:

$$26\,667\,067v_o + 53\,333\,333v_s = 0$$

$$\Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = -1,9999699$$

Khi  $v_s = 2V$ ,  $v_o = -3,9999398$ .

(1)  $\Rightarrow v_a = 20,066667\mu V$ .

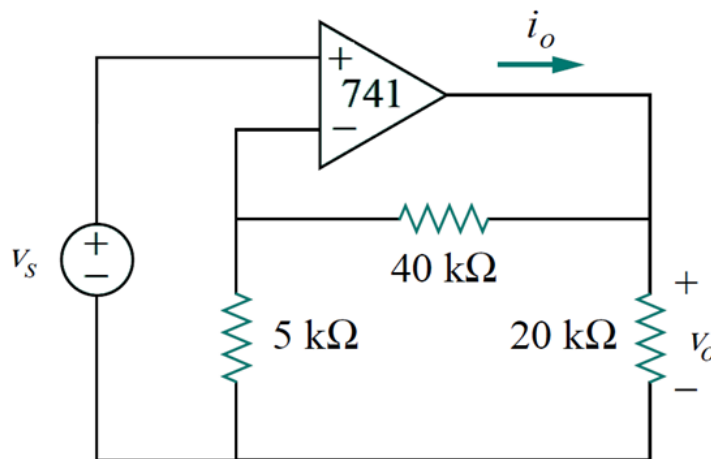
Suy ra:

$$i = \frac{v_a - v_o}{20 \times 10^3} = 0,1999mA$$

**VD:** Cho mạch điện như hình vẽ, trong đó op-amp có thông số như VD trên.

(a) Xác định  $v_o/v_s$ .

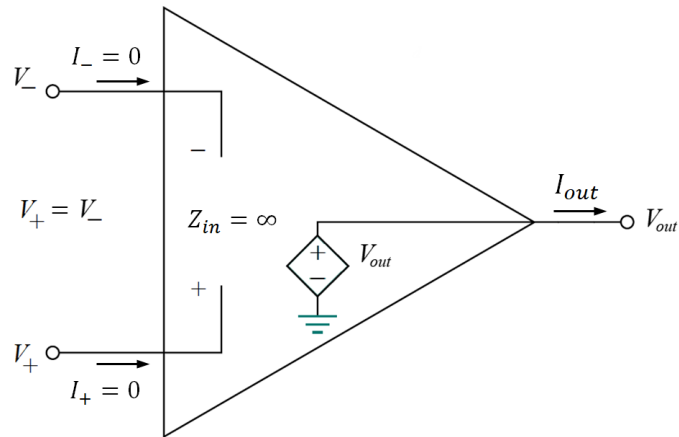
(b) Khi  $v_s = 1V$ , xác định  $i_o$ .



Giải: ...

### 3.2.2) Op-Amp lý tưởng

- Giả thiết op-amp lý tưởng được đưa ra nhằm đơn giản hóa việc phân tích và thiết kế mạch có sử dụng op-amp.
- Việc phân tích mạch sử dụng op-amp lý tưởng sẽ cho kết quả gần với trường hợp sử dụng op-amp thực (sai số không đáng kể).
- Các giả thiết op-amp lý tưởng:



- GT1: Trở kháng vào lớn vô cùng  $\Rightarrow I_+ = I_- = 0$
  - GT2: Hệ số khuếch đại lớn vô cùng  $\Rightarrow V_+ = V_-$  (để  $V_{out} < \infty$ )
  - GT3: Trở kháng ra bằng 0  $\Rightarrow$  điện áp ngõ ra không phụ thuộc dòng điện ngõ ra.
- So sánh thông số của op-amp lý tưởng và op-amp thực:

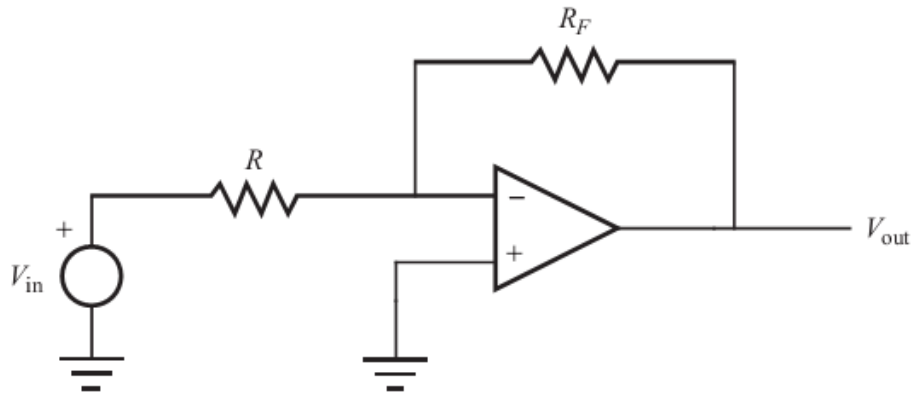
Thông số	Op-amp lý tưởng	Op-amp thực (tiêu biểu)
Trở kháng ngõ vào	$\infty$	2M $\Omega$
Hệ số khuếch đại	$\infty$	200 000
Trở kháng ngõ ra	0	75 $\Omega$
Băng thông	$\infty$	10kHz
Offset ngõ vào	0	1mV

### 3.2.3) Một số mạch op-amp thông dụng

- Dưới đây trình bày một số mạch op-amp với giả thiết op-amp lý tưởng.

#### a) Mạch khuếch đại đảo

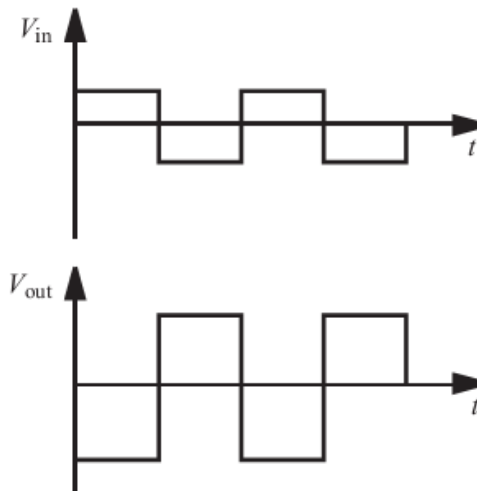
- Sơ đồ mạch:



$$V_{out} = -\frac{R_F}{R} V_{in}$$

**Nhận xét:**

- Bằng cách chọn  $R_F$  và  $R$ , ta có mạch khuếch đại tín hiệu với hệ số khuếch đại là  $R_F/R$ .
- Dấu trừ cho thấy tín hiệu ngõ ra ngược dấu tín hiệu ngõ vào.

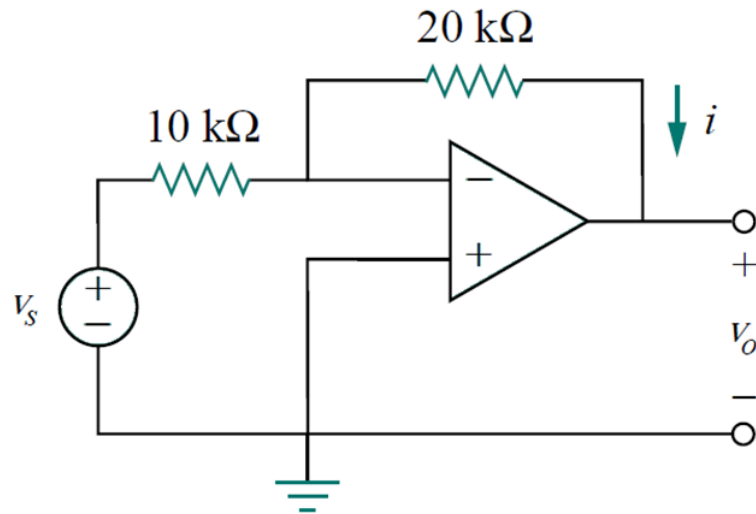


**VD:** Cho mạch có sơ đồ như hình dưới. Giả thiết op-amp lý tưởng.

(a) Xác định  $v_o/v_s$ .

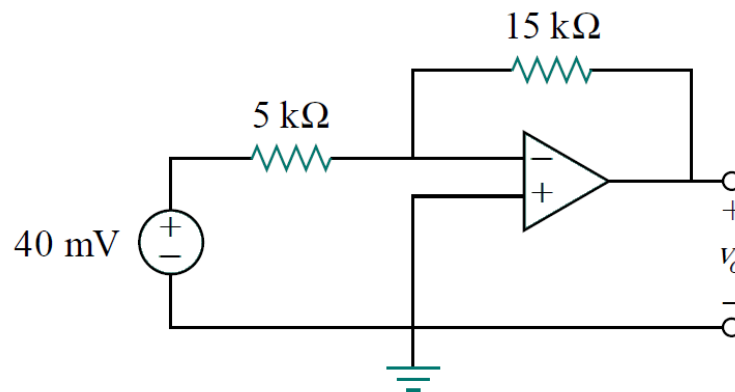
(b) Xác định  $i$  khi  $v_s = 2V$ .

(So sánh kết quả với VD ở phần 3.2.1)



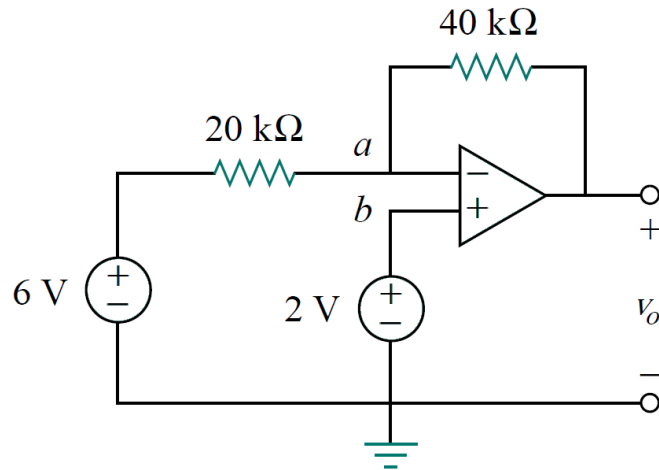
Giải: ...

**VD:** Xác định  $V_o$  và dòng điện đi qua điện trở hồi tiếp.



Giải: ...

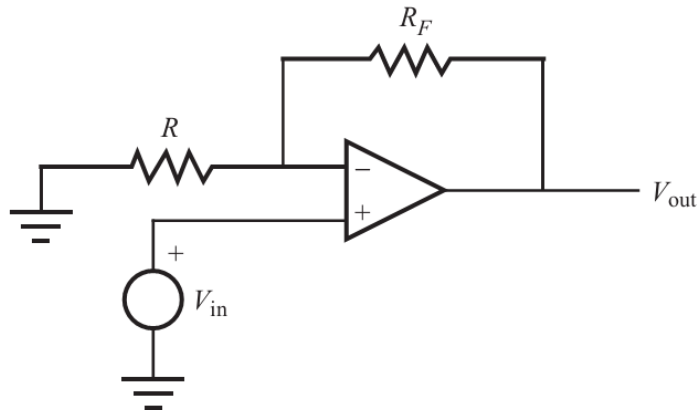
**VD:** Xác định  $V_o$



Giải: ...

### b) Mạch khuếch đại không đảo

- Sơ đồ mạch:



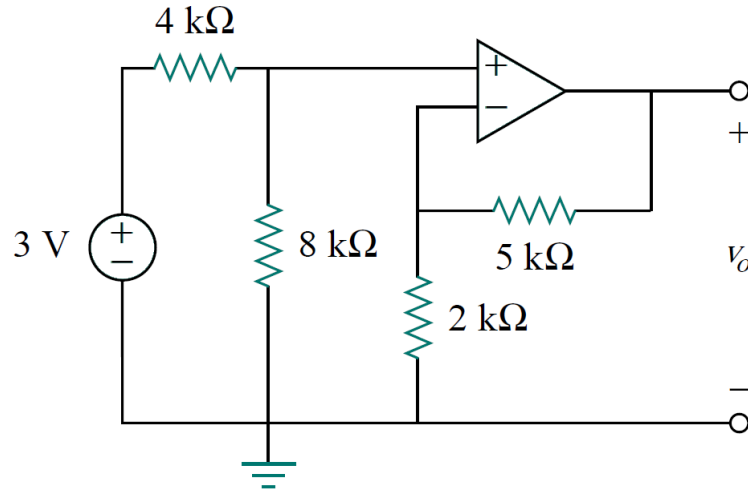
$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_F}{R}\right) V_{in}$$

Nhận xét:

- Bằng cách chọn  $R_F$  và  $R$ , ta có mạch khuếch đại tín hiệu với hệ số khuếch đại là  $(1 + R_F/R)$ .
- Tín hiệu ra cùng dấu tín hiệu vào.

**VD:** Xác định  $V_o$

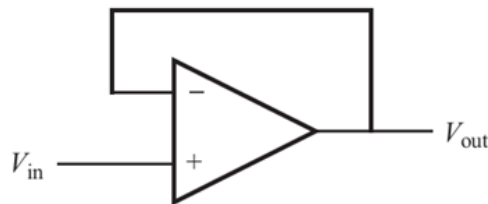




Giải: ...

### c) Mạch lặp điện áp

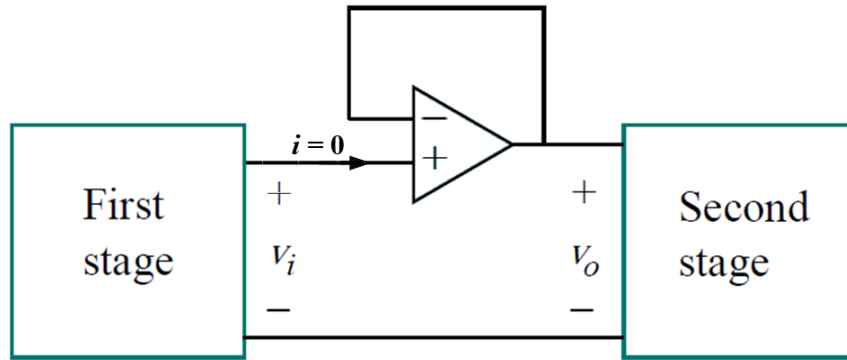
- Sơ đồ mạch:



- Sơ đồ trên có thể suy từ sơ đồ mạch khuếch đại không đảo bằng cách cho  $R_F = 0$ ,  $R = \infty$ . Công thức quan hệ áp ra theo điện áp vào:

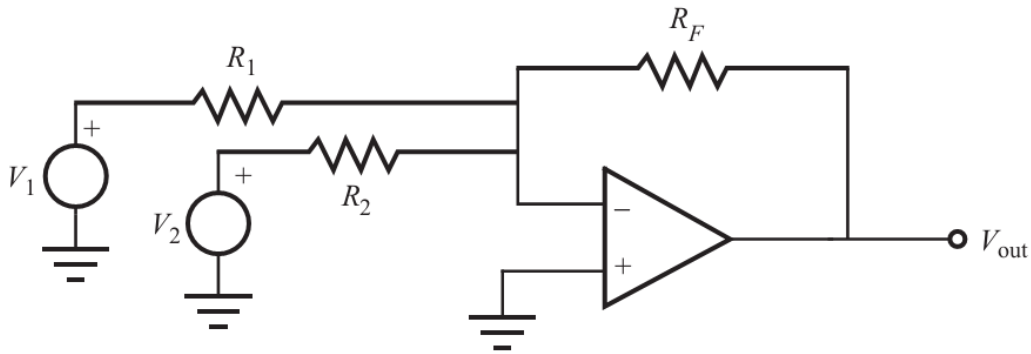
$$V_{out} = V_{in}$$

- Với trở kháng vào rất lớn, mạch này được dùng để cách ly các tầng mạch điện với nhau. Ta có thể xem như giữa các tầng mạch chỉ có “nối” với nhau về điện áp, mà không có dòng điện chảy qua giữa chúng.



#### d) Mạch cộng

- Sơ đồ mạch:

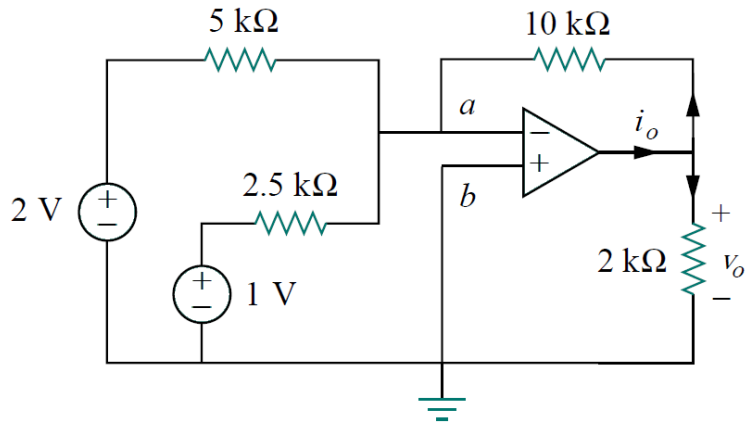


$$V_{out} = -R_F \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$$

Nếu chọn  $R_1 = R_2 = R$ :  $V_{out} = -\frac{R_F}{R} (V_1 + V_2)$

Nếu chọn  $R_1 = R_2 = R_F$ :  $V_{out} = -(V_1 + V_2)$

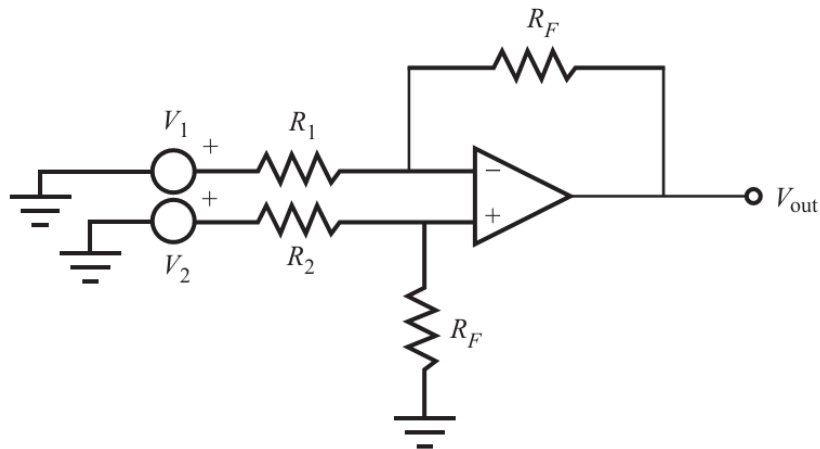
**VD**: Xác định  $v_o$  và  $i_o$



Giải: ...

### e) Mạch khuếch đại vi sai

- Sơ đồ mạch:



$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left(\frac{R_F}{R_2 + R_F}\right) V_2 - \frac{R_F}{R_1} V_1$$

Nếu chọn  $R_1 = R_2 = R$ , thì:

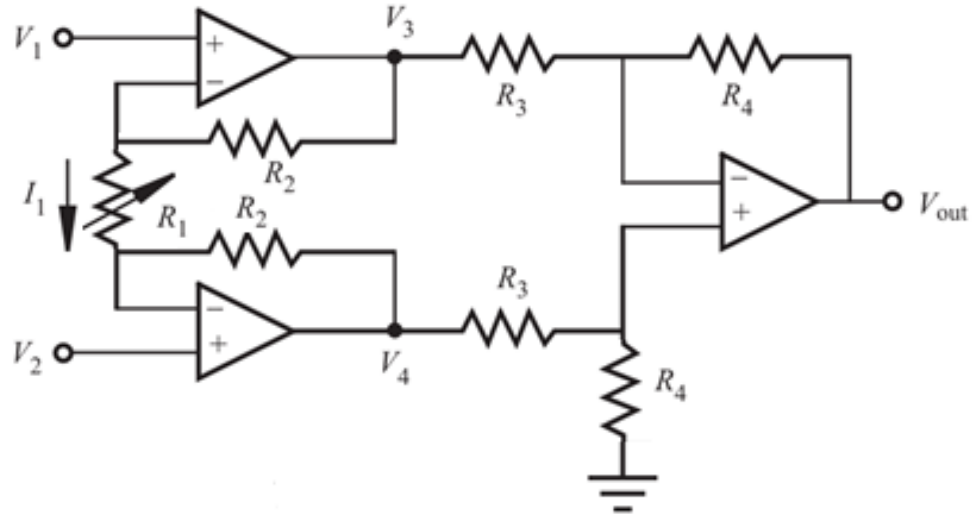
$$V_{out} = \frac{R_F}{R} (V_2 - V_1)$$

**VD:** Thiết kế mạch thực hiện biểu thức:  $V_o = 3V_2 - 5V_1$ .

Giải: ...

### f) Mạch khuếch đại dụng cụ

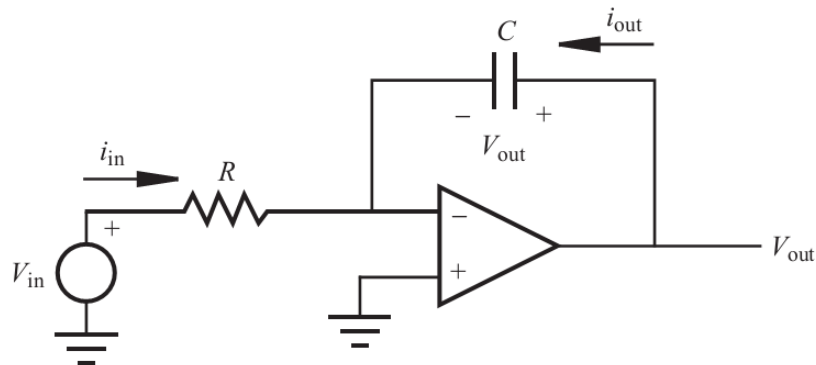
- Sơ đồ mạch:



$$V_{out} = \frac{R_4}{R_3} \left( 1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) (V_2 - V_1)$$

### g) Mạch tích phân

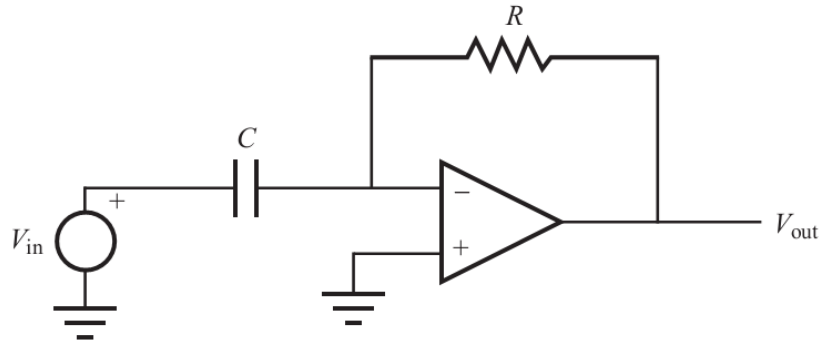
- Sơ đồ mạch tích phân lý tưởng:



$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{in}(\tau) d\tau + V_{out}(0)$$

### h) Mạch vi phân

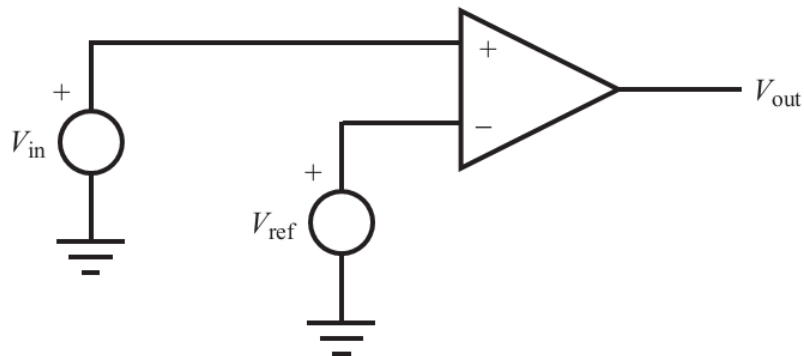
- Sơ đồ mạch:



$$V_{out}(t) = -RC \frac{dV_{in}(t)}{dt}$$

### i) Bộ so sánh (Comparator)

- Sơ đồ mạch:



$$V_{out} = \begin{cases} V_{sat+}, & V_+ > V_- \\ V_{sat-}, & V_+ < V_- \end{cases}$$

- Mạch này không có phản hồi. Ngõ ra luôn ở trạng thái bão hòa  $V_{sat+}$  hay  $V_{sat-}$  tùy vào kết quả so sánh  $V_{in}$  và  $V_{ref}$ .
- Lưu ý: Loại vi mạch này được thiết kế để dùng cho chức năng so sánh nên được gọi là comparator (bộ so sánh). Op-amp và comparator tuy giống nhau về ký hiệu nhưng khác nhau về cấu tạo mạch tích hợp bên trong.
- Điểm khác biệt của comparator so với op-amp:
  - Điện áp ngõ ra comparator:

$$V_{out} = \begin{cases} V_{sat+} \approx V_{s+}, & V_+ > V_- \\ V_{sat-} \approx V_{s-}, & V_+ < V_- \end{cases}$$

(trong đó  $V_{s+}$  và  $V_{s-}$  là điện áp nguồn cấp.)

Điện áp ngõ ra op-amp không có hồi tiếp:

$$V_{out} = \begin{cases} V_{sat+} < V_{s+}, & V_+ > V_- \\ V_{sat-} > V_{s-}, & V_+ < V_- \end{cases}$$

- Tốc độ chuyển trạng thái ở ngõ ra ( $V_{sat-} \leftrightarrow V_{sat+}$ ) của comparator nhanh hơn nhiều so với op-amp.

⇒ Không nên dùng op-amp để thực hiện chức năng so sánh.

- Một số vi mạch comparator: LM311, LM339, LM319, LM393, ...

### 3.2.4) Một số điều cần lưu ý khi sử dụng op-amp thực

- **Nguồn cấp:** Nguồn cấp op-amp thường là nguồn đôi, đối xứng (chẳng hạn  $\pm 5V$ ,  $\pm 12V$ ,  $\pm 15V$ , ...)

VD: LM741, OP07, TL082, TL084, ... sử dụng nguồn đôi.

Một số loại op-amp chạy nguồn đơn (single supply) (chẳng hạn  $0 - 5V$ ,  $0 - 12V$ , ...)

VD: LM158/LM258/LM358, LM2904, LT1006, ...

- **Điện áp ngõ ra của op-amp:**

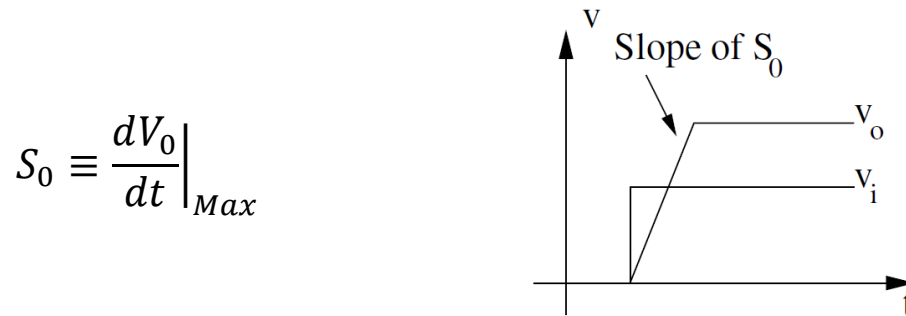
$$V_{s-} < V_{sat-} < V_o < V_{sat+} < V_{s+}$$

Một số op-amp có ngõ ra **rail-to-rail** thì:

$$V_{s-} \approx V_{sat-} < V_o < V_{sat+} \approx V_{s+}$$

- **Tần số đáp ứng** có giới hạn. Hệ số khuếch đại giảm khi tần số tín hiệu vào tăng.
- **Dòng điện ngõ ra** có giới hạn (thường khoảng  $\pm 25mA$ ). Do trở kháng ra của op-amp nhỏ, nên khi điện trở tải thay đổi, điện áp ngõ ra sẽ không thay đổi đáng kể. Tuy nhiên, nếu trở tải quá nhỏ, dòng tải bão hòa → mạch khuếch đại sẽ không còn tuyến tính nữa.
- **Slew rate:** Khi ngõ vào  $V_i$  thay đổi, ngõ ra không thay đổi ngay đến  $V_o$  tương ứng, mà phải một khoảng thời gian sau mới đạt được  $V_o$ .

Tốc độ thay đổi điện áp ngõ ra được thể hiện ở thông số “slew rate” trong datasheet, đơn vị là  $V/\mu s$ . Khả năng xử lý tín hiệu tín hiệu có tần số và biên độ ở mức nào tùy thuộc vào slew rate của op-amp.



**VD:** Một mạch khuếch đại đảo, có hệ số khuếch đại  $|A| = 10$ , thực hiện bởi op-amp có slew rate  $S_0 = 1V/\mu s$ . Giả sử tín hiệu vào hình sin, tần số  $\omega$ , biên độ  $V_i = 1V$ .

$$v_i = V_i \cos(\omega t) \Rightarrow v_o = -|A|V_i \cos(\omega t)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = +|A|V_i \omega \sin(\omega t) \Rightarrow \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{Max} = |A|V_i \omega$$

Op-amp có slew rate  $S_0$  nghĩa là mạch có giới hạn:

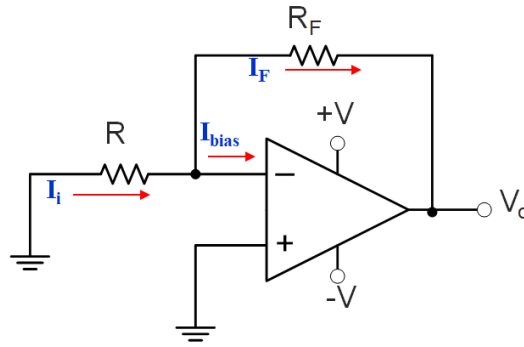
$$\left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{Max} = |A|V_i \omega < S_0$$

Với  $|A| = 10$ ,  $V_i = 1V$ ,  $S_0 = 1V/\mu s$ , ta có:

$$10\omega < 10^6 \Rightarrow \omega < 10^5 \text{ (rad/s)}$$

Như vậy, tần số giới hạn tín hiệu vào là  $10^5$  (rad/s), nếu lớn hơn thì tín hiệu ra bị méo dạng. Để tránh bị méo dạng với thì có thể hoặc giảm tần số, hoặc giảm biên độ, hoặc giảm hệ số khuếch đại.

- **Dòng vào định thiên** (Input bias current,  $I_{bias}$ ): Xét mạch điện dưới đây. Nếu giả thiết op-amp lý tưởng thì  $I_{bias} = 0$  và do đó  $V_o = 0$ . Nhưng với op-amp thực,  $I_{bias} \neq 0$ .



Ta có:

$$I_i = I_{bias} + I_F$$

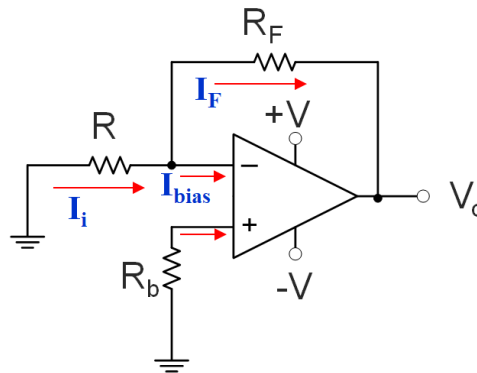
$$\Rightarrow \frac{0 - V_{(-)}}{R} = \frac{V_{(-)} - V_o}{R_F} + I_{bias}$$

Mặc khác  $V_{(-)} \approx V_{(+)} = 0$ , nên:

$$V_o = R_F I_{bias} \neq 0$$

Nhận xét:

- Tuy  $I_{bias}$  rất nhỏ, nhưng nếu  $R_F$  lớn thì  $V_o$  cũng đáng kể.
- Để khử ảnh hưởng dòng định thiên, người ta nối thêm một điện trở  $R_b = \frac{R_F R}{R_F + R}$  ở ngõ vào (+) của op-amp như hình.

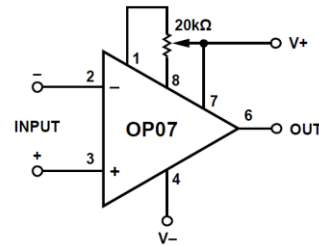
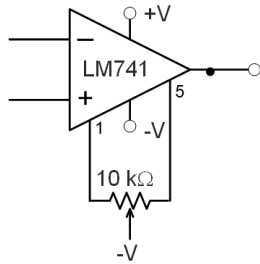


(SV tự chứng minh khi nối thêm  $R_b$  như trên thì  $V_o = 0$ )

- **Điện áp lệch ngõ vào** (input offset voltage): Ở mạch điện trên, ngay cả khi dùng điện trở  $R_b$  để khử ảnh hưởng của dòng định thiên thì thực tế  $V_o$  cũng không bằng 0 dù ngõ vào bằng 0. Để



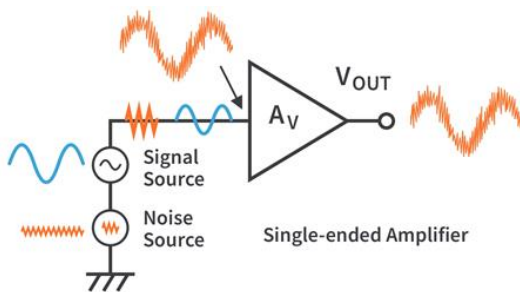
chỉnh offset, ta dùng 1 biến trở nối vào 2 chân offset của op-amp theo sơ đồ trong datasheet.



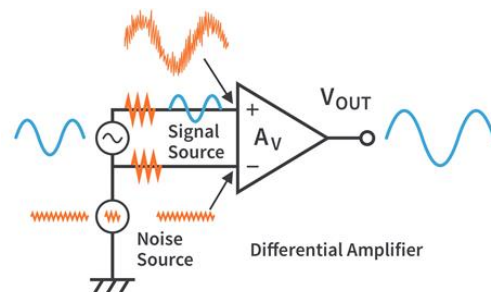
- **CMRR** (Common Mode Rejection Ratio): là số đo khả năng của bộ khuếch đại vi sai khử bỏ phần chung (nhiều) của tín hiệu ở 2 ngõ vào vi sai.

$$CMRR = 20 \log \frac{A_{vd}}{A_{cm}}$$

trong đó:  $A_{vd}$  là hệ số khuếch đại điện áp vi sai,  $A_{cm}$  là hệ số khuếch đại mode chung.



Bộ khuếch đại một đầu đơn



Bộ khuếch đại vi sai

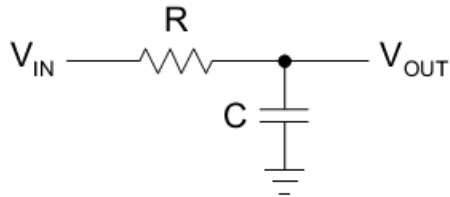
Bộ khuếch đại vi sai có CMRR càng lớn càng tốt. Op-amp lý tưởng có  $CMRR = \infty$ . Op-amp thực có CMRR thường khoảng +80dB (10000).

$CMRR = 80\text{dB}$  có nghĩa là, nếu tín hiệu vi sai và nhiễu mode chung ở ngõ vào có độ lớn bằng nhau thì ở ngõ ra, tín hiệu (có ích) lớn hơn 10000 lần so với nhiễu.

### 3.3) Lọc tín hiệu

#### 3.3.1) Lọc thông thấp thụ động

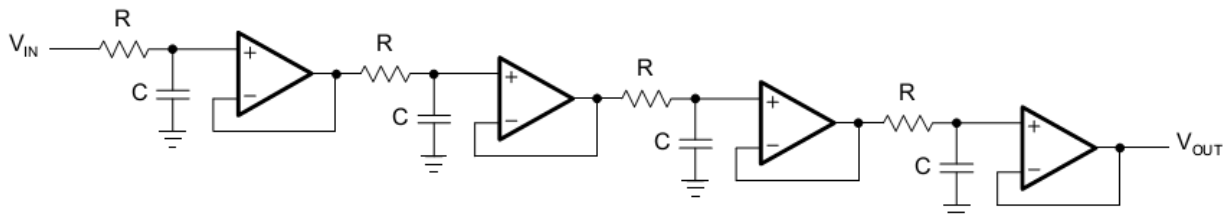
- Bậc 1:



$$\text{Hàm truyền: } H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{RCs+1}$$

$$\text{Tần số cắt: } f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

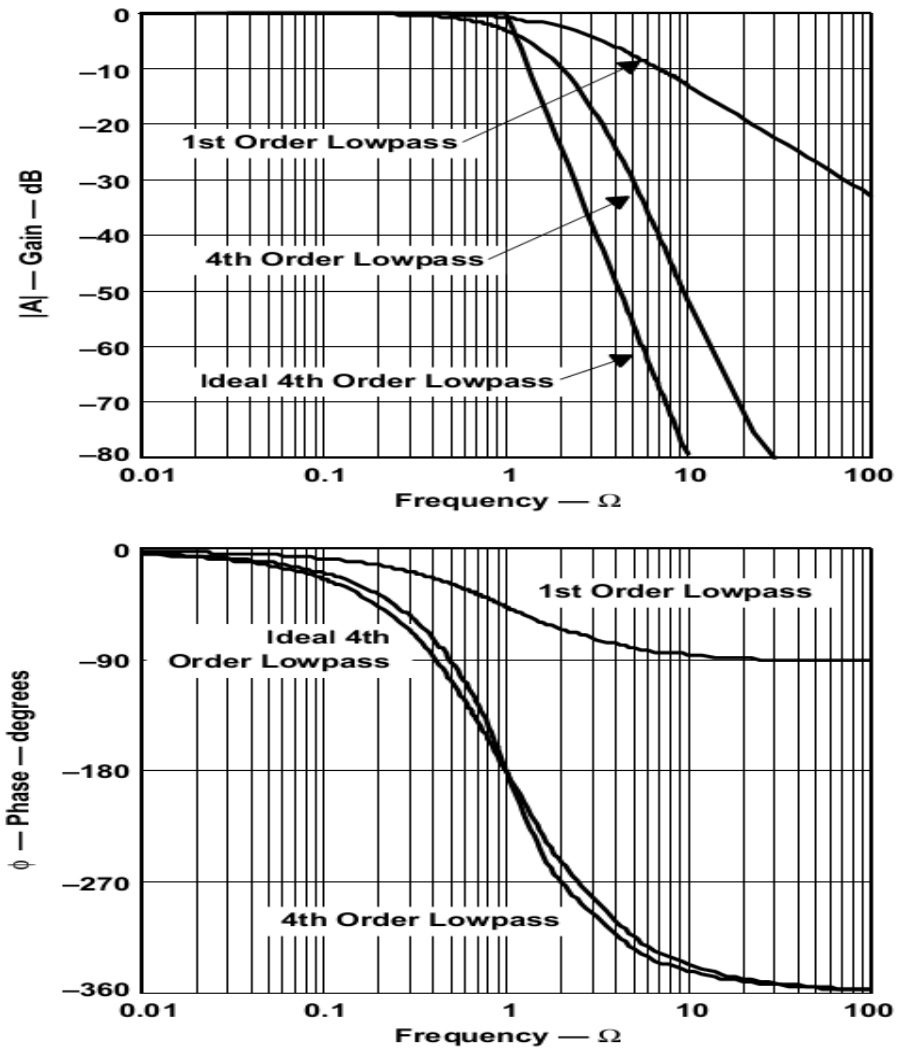
- Nối tiếp 4 bộ lọc RC bậc 1 để tạo thành bộ lọc bậc 4:



$$\text{Hàm truyền: } H(s) = \frac{1}{(RCs+1)^4}$$

$$\text{Tần số cắt: } f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Biểu đồ Bode:

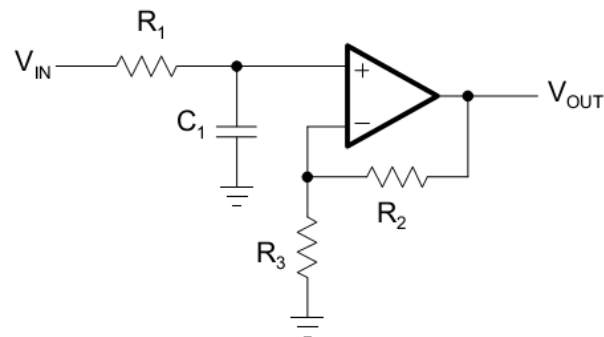


$$\Omega = \omega/\omega_c = f/f_c$$

### 3.3.2) Lọc thông thấp tích cực

- Lọc tích cực cho phép tín hiệu ra có thể được khuếch đại.

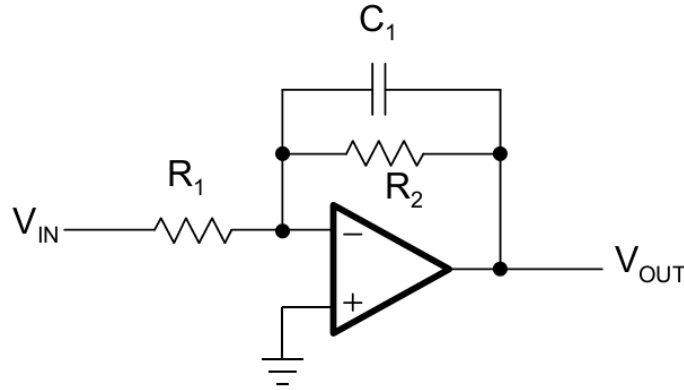
a) Mạch lọc thông thấp bậc 1 không đảo:



Hàm truyền:  $H(s) = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \left(\frac{1}{R_1 C_1 s + 1}\right)$

Tần số cắt:  $f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$

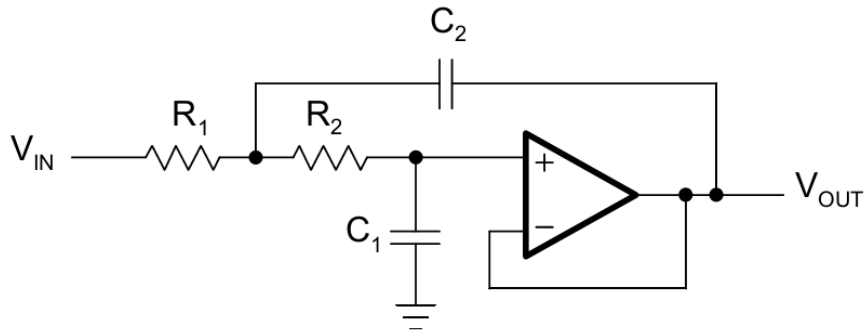
**b) Mạch lọc thông thấp bậc 1 đảo:**



Hàm truyền:  $H(s) = -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{R_2 C_1 s + 1}\right)$

Tần số cắt:  $f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$

**c) Mạch lọc thông thấp bậc 2:**



(mạch Sallen-Key)

Hàm truyền:  $H(s) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 + R_2) C_1 s + 1}$

Tần số cắt:  $f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$

Hệ số phẩm chất:  $Q = \frac{1}{2\xi} = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{(R_1 + R_2) C_1}$

Đặt  $R_1 = mR$ ,  $R_2 = R$ ,  $C_1 = nC$ ,  $C_2 = C$  thì:

$$G_F(s) = \frac{1}{mnR^2C^2s^2 + (m+1)RCs + 1}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{mn}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{mn}}{m+1}$$

**VD:** Thiết kế mạch lọc thông thấp bậc 2 có tần số cắt 5kHz, hệ số phẩm chất là 0,5.

$$Q = \frac{\sqrt{mn}}{m+1} = 0,5 \Rightarrow \text{chọn } m = n = 1.$$

$$\Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 5 \text{ kHz}$$

$$\Rightarrow RC = 3,183 \times 10^{-5}$$

$$\text{Chọn } C = 1nF \Rightarrow R = \frac{3,183 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-9}} = 31,83k\Omega$$

$$\text{Chọn } R = 33 k\Omega$$

**Phụ lục:** Bảng giá trị chuẩn của điện trở và tụ điện.

Standard Resistor Values ( $\pm 5\%$ )						
1.0	10	100	1.0K	10K	100K	1.0M
1.1	11	110	1.1K	11K	110K	1.1M
1.2	12	120	1.2K	12K	120K	1.2M
1.3	13	130	1.3K	13K	130K	1.3M
1.5	15	150	1.5K	15K	150K	1.5M
1.6	16	160	1.6K	16K	160K	1.6M
1.8	18	180	1.8K	18K	180K	1.8M
2.0	20	200	2.0K	20K	200K	2.0M
2.2	22	220	2.2K	22K	220K	2.2M
2.4	24	240	2.4K	24K	240K	2.4M
2.7	27	270	2.7K	27K	270K	2.7M
3.0	30	300	3.0K	30K	300K	3.0M
3.3	33	330	3.3K	33K	330K	3.3M
3.6	36	360	3.6K	36K	360K	3.6M
3.9	39	390	3.9K	39K	390K	3.9M
4.3	43	430	4.3K	43K	430K	4.3M
4.7	47	470	4.7K	47K	470K	4.7M
5.1	51	510	5.1K	51K	510K	5.1M
5.6	56	560	5.6K	56K	560K	5.6M
6.2	62	620	6.2K	62K	620K	6.2M
6.8	68	680	6.8K	68K	680K	6.8M
7.5	75	750	7.5K	75K	750K	7.5M
8.2	82	820	8.2K	82K	820K	8.2M
9.1	91	910	9.1K	91K	910K	9.1M

Standard Capacitor Values ( $\pm 10\%$ )						
10pF	100pF	1000pF	.010 $\mu$ F	.10 $\mu$ F	1.0 $\mu$ F	10 $\mu$ F
12pF	120pF	1200pF	.012 $\mu$ F	.12 $\mu$ F	1.2 $\mu$ F	
15pF	150pF	1500pF	.015 $\mu$ F	.15 $\mu$ F	1.5 $\mu$ F	
18pF	180pF	1800pF	.018 $\mu$ F	.18 $\mu$ F	1.8 $\mu$ F	
22pF	220pF	2200pF	.022 $\mu$ F	.22 $\mu$ F	2.2 $\mu$ F	22 $\mu$ F
27pF	270pF	2700pF	.027 $\mu$ F	.27 $\mu$ F	2.7 $\mu$ F	
33pF	330pF	3300pF	.033 $\mu$ F	.33 $\mu$ F	3.3 $\mu$ F	33 $\mu$ F
39pF	390pF	3900pF	.039 $\mu$ F	.39 $\mu$ F	3.9 $\mu$ F	
47pF	470pF	4700pF	.047 $\mu$ F	.47 $\mu$ F	4.7 $\mu$ F	47 $\mu$ F
56pF	560pF	5600pF	.056 $\mu$ F	.56 $\mu$ F	5.6 $\mu$ F	
68pF	680pF	6800pF	.068 $\mu$ F	.68 $\mu$ F	6.8 $\mu$ F	
82pF	820pF	8200pF	.082 $\mu$ F	.82 $\mu$ F	8.2 $\mu$ F	