

Bài 10: KHUẾCH ĐẠI THUẬT TOÁN

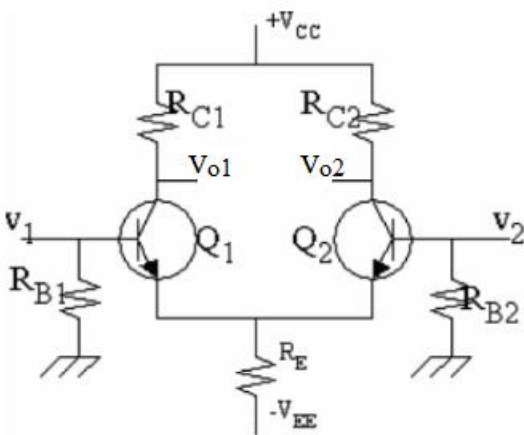
Mạch khuếch đại thuật toán (Operational Amplifier), thường được gọi tắt là Op-Amp là một mạch khuếch đại "DC-coupled" (tín hiệu đầu vào bao gồm cả tín hiệu BIAS) với hệ số khuếch đại rất cao, có đầu vào vi sai và thông thường có đầu ra đơn. Trong những ứng dụng thông thường, đầu ra được điều khiển bằng một mạch hồi tiếp âm sao cho có thể xác định độ lợi đầu ra, tổng trở đầu vào và tổng trở đầu ra.

Các mạch khuếch đại thuật toán (KĐTT) được ứng dụng nhiều trong các thiết bị điện tử dân dụng, công nghiệp và khoa học. Các mạch khuếch đại thuật toán thông dụng hiện nay có giá thành rất rẻ. Các thiết kế hiện đại đã được điện tử hóa chặt chẽ hơn trước đây, và một số thiết kế cho phép mạch điện chịu đựng được tình trạng ngắn mạch đầu ra mà không làm hư hỏng.

Một bộ KĐTT có hai đầu vào mà thực chất chính là 2 đầu vào của một bộ khuếch đại vi sai, tầng đầu của bộ KĐTT.

10.1 Mạch khuếch đại vi sai

Dạng căn bản của mạch khuếch đại vi sai được trình bày như hình sau:



Hình 10.1: Mạch khuếch đại vi sai

- Mạch đối xứng theo đường thẳng đứng. Các phần tử tương ứng giống nhau về mọi đặc tính.

$$R_{B1} = R_{B2} ; R_{C1} = R_{C2} ; V_{CC} = V_{EE}$$

Transistor Q1 và Q2 giống nhau, thường được chế tạo trên cùng một mẫu tinh thể.

- Mạch có 2 ngõ vào là v_1 , v_2 và 2 ngõ ra là V_{o1} , V_{o2}

- Có 2 phương pháp lấy tín hiệu ra: Lấy ra ở cả 2 cực C của hai transistor hoặc lấy ra từ một cực và điểm GND.

- Phân biệt 3 trường hợp:

+ Khi hai tín hiệu vào cùng biên độ và cùng pha $v_1 = v_2$, ta có tín hiệu ngõ ra:

$$v_{o1} = K.v_1$$

$$v_{o2} = K.v_2$$

Do mạch là đối xứng nên ta có $v_{o1} = v_{o2}$ suy ra ngõ ra vi sai bằng 0.

+ Khi tín hiệu vào có dạng vi sai $v_1 = -v_2$ (cùng biên độ nhưng ngược pha): khi đó ta có $v_{o1} - v_{o2} = K_{vs}(v_1 - v_2)$ khác 0, trong đó K_{vs} là hệ số khuếch đại vi sai, giá trị này thường rất lớn.

Như vậy, mạch khuếch đại vi sai chỉ khuếch đại đại lượng là sai số của 2 tín hiệu vào mà không khuếch đại từng tín hiệu thành phần.

+ Khi hai tín hiệu vào là bất kỳ, thì mạch khuếch đại sẽ khuếch đại cả thành phần vi sai và không vi sai của 2 tín hiệu đó.

a) Mạch phân cực

Ta có: $I_C = I_E = I_{C1} + I_{C2}$ và $I_{C1} = I_{C2} \Rightarrow I_E = 2I_{C1}$ hoặc $I_E = 2I_{C2}$

$$\Rightarrow I_{C1} = I_{C2} = I_E/2$$

Và ta có: $R_{C1} = R_{C2} = R_C$

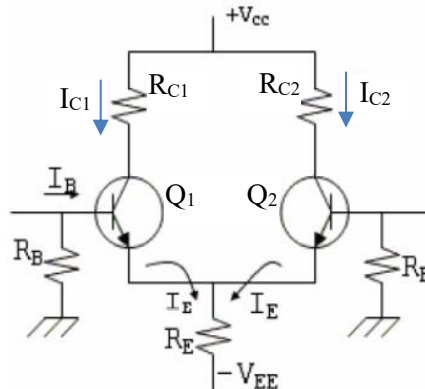
Khi mạch hoàn toàn đối xứng, ta có:

$$V_{CC} + V_{EE} - R_C I_{C1} - V_{CE1} - R_E I_E = 0$$

Hoặc:

$$V_{CC} + V_{EE} - R_C I_{C2} - V_{CE2} - R_E I_E = 0$$

$$\text{Suy ra: } V_{CE1} = V_{CE2} = V_{CC} + V_{EE} - R_C I_E/2 - R_E I_E$$



Hình 10.2: Mạch phân cực

Ngoài ra ta có:

$$R_B I_B + V_{BE} + 2R_E I_E - V_{EE} = 0$$

Mà ta có:

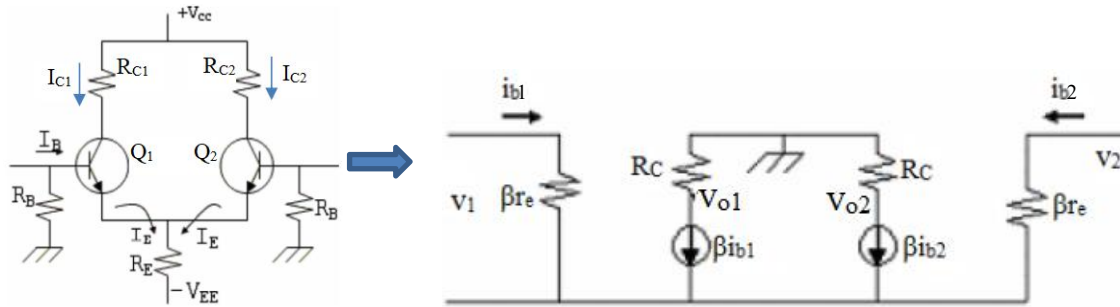
$$I_E = I_C = \beta I_B \text{ hay } I_B = I_E / \beta$$

$$\text{Suy ra: } R_B I_E / \beta + V_{BE} + 2R_E I_E - V_{EE} = 0$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{2R_E + \frac{R_B}{\beta}} \approx I_C$$

b) Mạch tương đương xoay chiều

Ta có mạch tương đương xoay chiều của mạch khuếch đại vi sai được trình bày trong hình sau:



Hình 10.3: Mạch tương đương xoay chiều

$$\text{Ta có: } v_1 = -v_2 ; v_{o1} = -v_{o2} ; R_{C1} = R_{C2} = R_C$$

Như vậy dòng điện luôn ngược chiều trong hai transistor, không qua R_E nên có thể bỏ qua R_E trong khi tính toán:

Từ mạch tương đương trên ta thấy dòng điện qua R_C bằng dòng điện βi_b nhưng ngược chiều nhau, do đó ta có: $\frac{v_{o1}}{R_C} = -\beta i_{b1}$; mà ta có $i_{b1} = \frac{v_1}{\beta r_e}$

$$\text{Suy ra: } \frac{v_{o1}}{R_C} = -\frac{v_1}{r_e} \Rightarrow \frac{v_{o1}}{v_1} = -\frac{R_C}{r_e}$$

$$\text{Ngoài ra: } A_v = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_1 - v_2} ; \text{ mà ta có } v_1 = -v_2 ; v_{o1} = -v_{o2}$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{2v_{o1}}{2v_1} = \frac{v_{o1}}{v_1} = -\frac{R_C}{r_e}$$

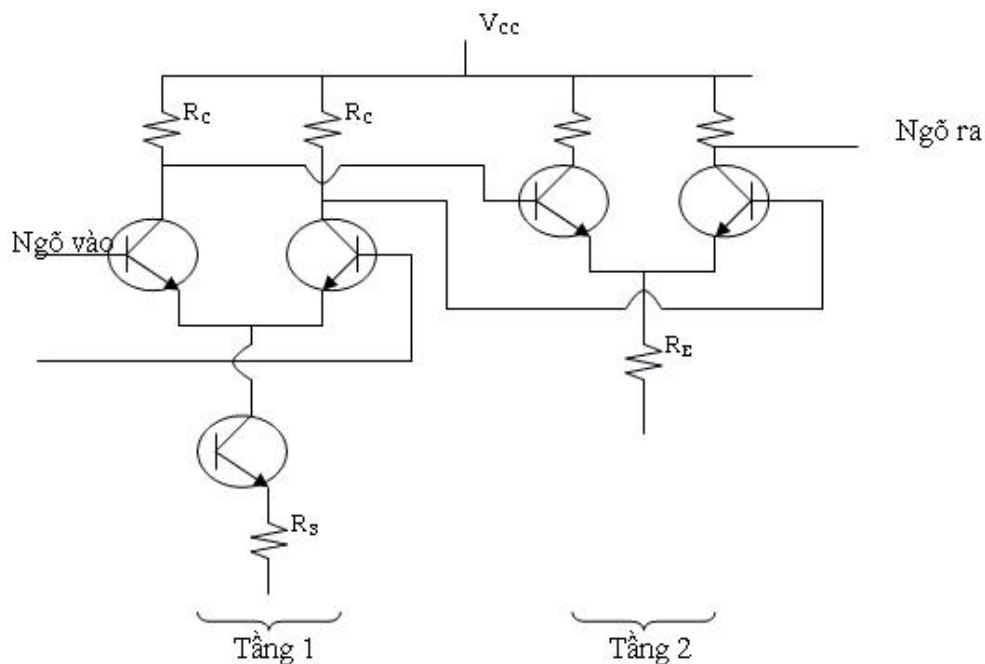
10.2 Các tầng trong mạch Op-amp

Mạch Op-amp sử dụng mạch vi sai tổng hợp, gồm 3 tầng: tầng đầu, các tầng giữa và tầng cuối.

a) **Tầng đầu:** khuếch đại vi sai căn bản (đã khảo sát bên trên).

b) **Các tầng giữa:** khuếch đại trung gian, các tầng giữa có thể là vi sai hay đơn cực.

* *Mắc nối tiếp vi sai với vi sai:* sơ đồ mạch mắc nối tiếp vi sai với vi sai được trình bày trong hình sau:



Hình 10.4: Mắc nối tiếp vi sai với vi sai

Tuy nhiên đối với mạch này thì tổng trở vào của tầng vi sai thứ 2 có thể làm mất cân bằng tổng trở ra của tầng vi sai trước. Tầng sau không cần dùng nguồn dòng điện.

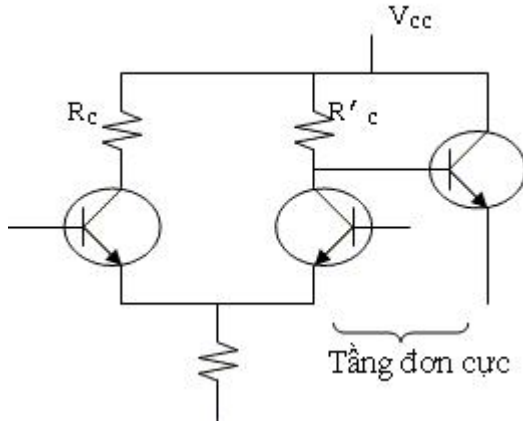
* *Mắc vi sai nối tiếp với đơn cực:*

Người ta thường dùng tầng đơn cực để:

- Dễ sử dụng.
- Dễ tạo mạch công suất.

Nhưng mạch đơn cực sẽ làm phát sinh một số vấn đề mới:

- Làm mất cân bằng tăng vi sai, nên hai điện trở R_C của tăng vi sai đôi khi phải có trị số khác nhau để bù trừ cho sự mất cân bằng.



Trong đó:

$$R_C = R'_C // Z_V$$

Với Z_V là tổng trở vào của tăng đơn cực.

Hình 10.5

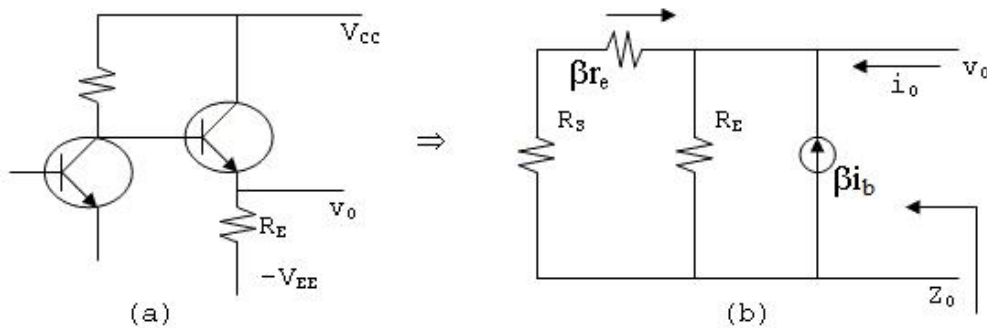
c) Tầng cuối: khuếch đại đậm

Phải thỏa mãn các điều kiện:

- Cho một tổng trở ra thật nhỏ.
- Điện áp phân cực tại ngõ ra bằng 0 volt khi hai ngõ vào ở 0 volt.

* Điều kiện về tổng trở ra:

Để được tổng trở ra nhỏ, người ta thường dùng mạch cực thu chung.



Hình 10.6

Để tính tổng trở ra ta dùng mạch tương đương hình 10.6(b), trong đó R_s là tổng trở ra của tầng (đơn cực) đứng trước.

Ta có:

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o}$$

Phân giải mạch ta tìm được:

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{R_E(R_S + \beta r_e)}{R_E(1 + \beta) + \beta r_e + R_S}$$

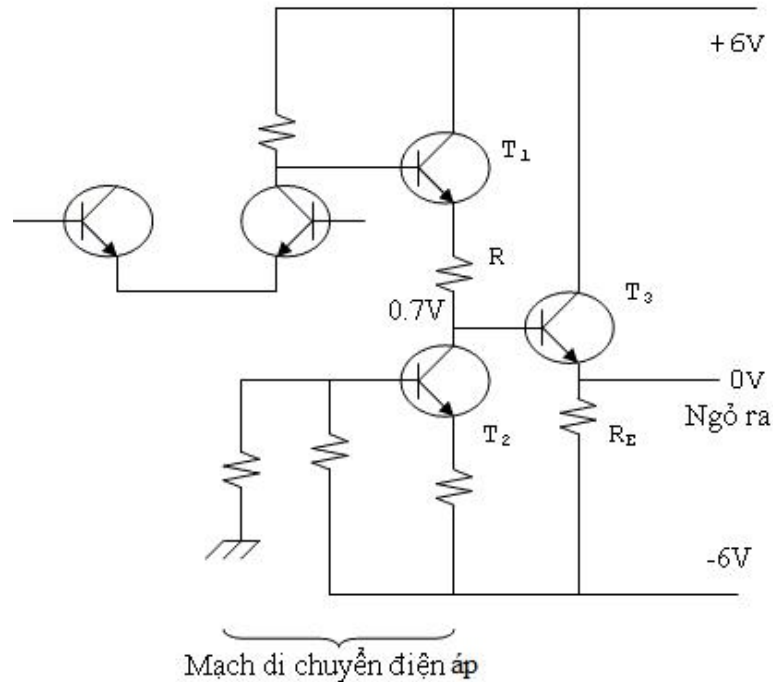
Thông thường βR_E rất lớn nên:

$$Z_o = \frac{v_o}{I_o} \approx r_e + \frac{R_S}{\beta}$$

* *Điều kiện về điện áp phân cực:*

Vì các tầng được mắc trực tiếp với nhau nên điện áp phân cực ngõ ra của tầng cuối có thể không ở 0 volt khi ngõ vào ở 0 volt. Để giải quyết người ta dùng mạch di chuyển điện áp (Level shifting network) gồm có: một nguồn dòng điện I và một điện trở R sao cho: $E = R.I$, trong đó E là điện áp phân cực ngõ ra (khác 0 volt) của tầng cuối. Tuy nhiên, như vậy tổng trở ra sẽ tăng thêm một trị số là R. Vì vậy để thoả mãn cả hai điều kiện, người ta dùng mạch di chuyển điện áp trước một tầng cực thu chung.

Ta có sơ đồ mạch của tầng cuối như sau:

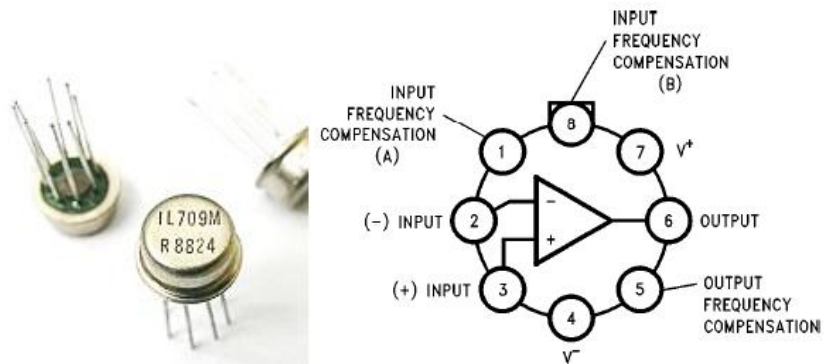


Hình 10.7

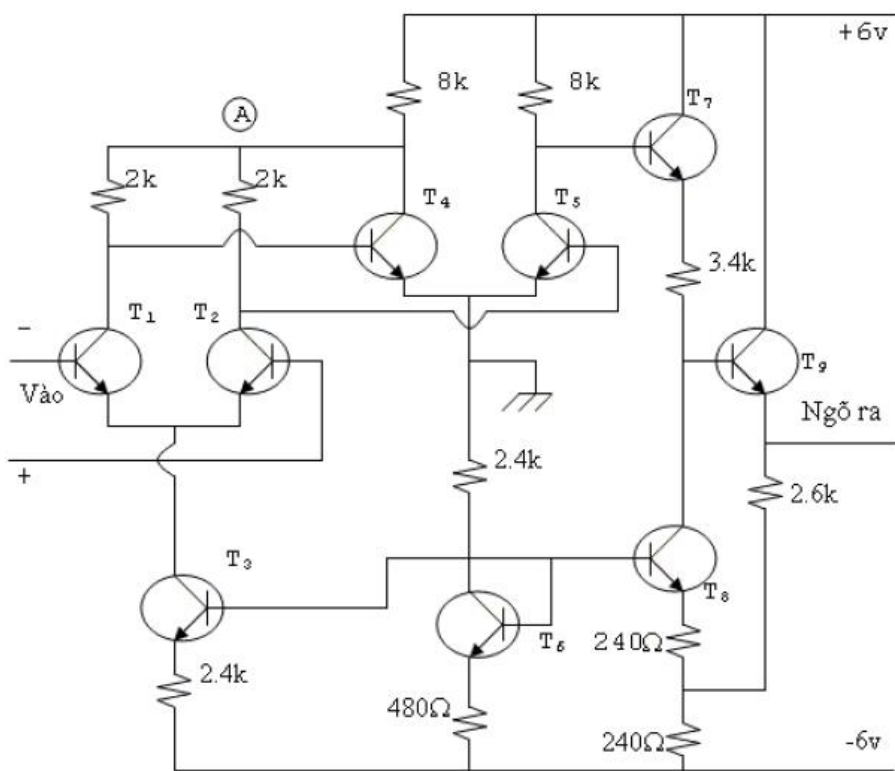
Trong đó R và T_2 là mạch di chuyển điện áp, T_3 là tầng cực thu chung để cho tổng trở ra nhỏ.

Như vậy ta thấy rằng Op-Amps là linh kiện điện tử được tạo thành từ sự tổ hợp của nhiều phần tử tích cực (transistor) với các phần tử thụ động khác theo một qui luật riêng được nhà sản xuất qui định.

Ví dụ: một Op-Amp μ pc 709 của hãng Fairchild:



Hình 10.8: Sơ đồ chân của Op-Amp μ pc 709



Hình 10.9: Sơ đồ mạch của Op-Amp μ pc 709

T₁, T₂: Mạch vi sai căn bản ngõ vào.

T₃: Nguồn dòng điện cho T₁ và T₂. Điện áp phân cực tại cực nền của T₃ được xác định bởi cầu phân áp gồm T₆ (mắc thành diode), điện trở 480Ω và 2.4kΩ.

T₄, T₅: không phải là vi sai vì 2 chân E nối mass. T₄ có nhiệm vụ ổn định điện áp tại điểm A cho T₁ và T₂.

T₅: Là tầng đơn cực chuyển tiếp giữa vi sai và tầng cuối.

T₇: Là mạch cực thu chung đầu tiên và T₈ là mạch di chuyển điện áp với điện trở 3.4k.

T₉: Là mạch cực thu chung cũng là tầng cuối để đạt được tổng trở ra nhỏ.

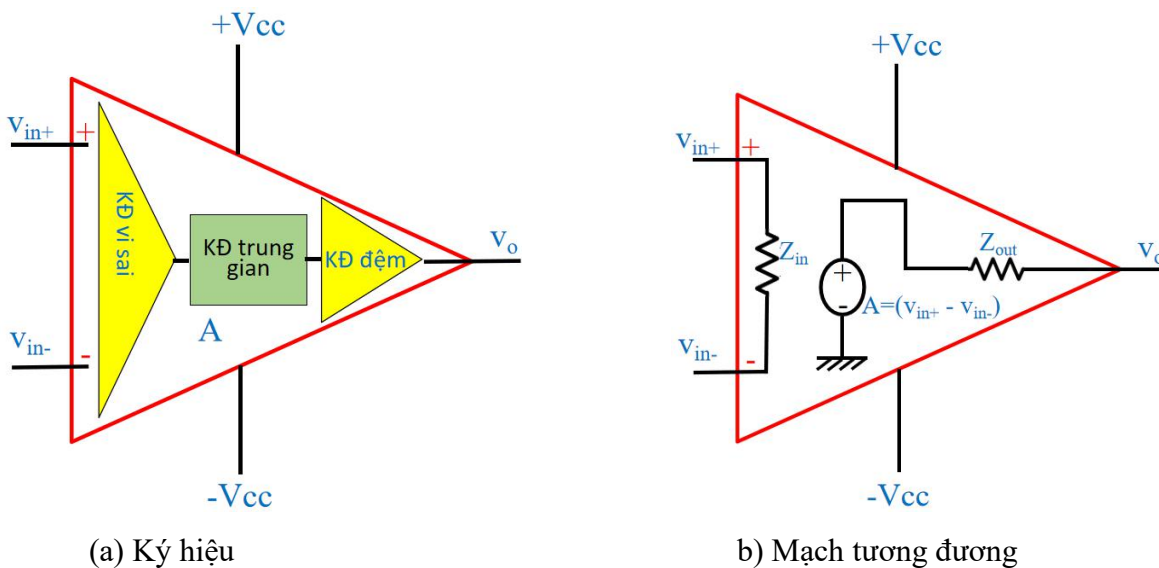
10.3 Mạch khuếch đại thuật toán căn bản

Mạch khuếch đại thuật toán lý tưởng có một số đặc tính như sau:

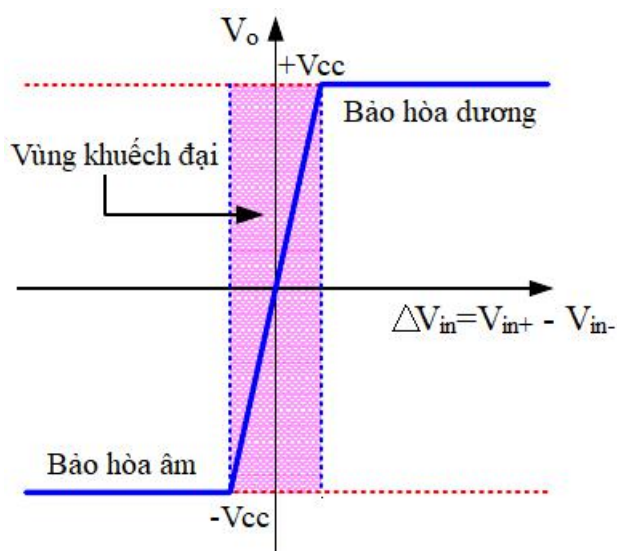
Op-Amp lý tưởng	Op-Amp thực tế
Độ lợi (A) vô cùng lớn	Độ lợi 100.000 → 200.000
Tổng trở vào $\rightarrow \infty$	Tổng trở vào $10^6 \rightarrow 10^3 \Omega$
Tổng trở ngõ ra = 0	Tổng trở ngõ ra nhỏ
Băng thông $\rightarrow \infty$	Băng thông hữu hạn
Dòng vào tĩnh = 0	Dòng vào tĩnh nhỏ
Dòng vào lệch = 0	Dòng vào lệch 20 → 30nA
Điện áp lệch $V_{\text{offset}}=0$	Điện áp lệch: 2 → 10mV
Slew Rate: SR $\rightarrow \infty$	Slew Rate: 0.7 → 100mV/ms

Để đơn giản trong việc tính toán trên Op-Amp, có thể tính toán trên Op-Amp lý tưởng sau đó thực hiện hiệu chỉnh các thông số trong mạch. Trên thực tế có những Op-Amps được chế tạo với mục đích chuyên dụng (trong kỹ thuật hàng không vũ trụ, quân sự, y tế, công nghiệp ...), các đặc tính của nó rất gần với đặc tính của Op-Amps lý tưởng.

Op-Amp chỉ có một đầu ra duy nhất, hai đầu vào cấp nguồn và các chân bù điện áp, bù tần số, ... Hình 10.10 và Hình 10.11 trình bày ký hiệu, mạch tương đương và đặc tính chuyển điện áp của Op-Amp.



Hình 10.10: Ký hiệu và mạch tương đương của Op-Amp



Hình 10.11: Đặc tính chuyển điện áp của Op-Amp

Khi tính toán đối với Op-Amp lý tưởng cần lưu ý một số quy tắc sau:

- ❖ Độ lợi A (hệ số khuếch đại) vô cùng lớn nên điện áp ở ngõ vào + và - của Op-Amp là bằng nhau.

$$\text{Ta có: } v_o = A(v_{in+} - v_{in-})$$

$$\Leftrightarrow A = \frac{v_o}{v_{in+} - v_{in-}} \rightarrow \infty \text{ suy ra: } v_{in+} - v_{in-} = 0 \Leftrightarrow v_{in+} = v_{in-}$$

- ❖ Tổng trở vào của Op-Amp bằng vô cùng nên không có dòng điện chạy vào hoặc ra ở ngõ vào + và - của Op-Amp.

$$Z_{in} = \infty \text{ suy ra } i_+ = i_- = 0$$

- ❖ Tổng trở ra của Op-Amp bằng không nên điện áp ngõ ra không phụ thuộc vào dòng điện ra.

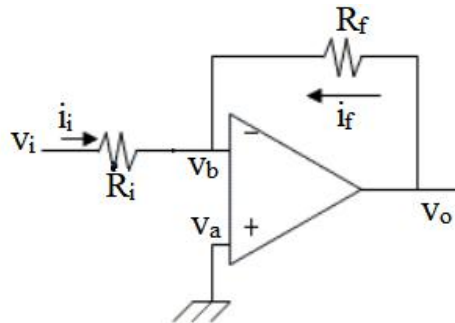
$$Z_{out} = 0 \Rightarrow v_o \text{ không phụ thuộc vào dòng điện } i_o$$

- ❖ Trong mạch khuếch đại thuật toán lý tưởng, khi cả hai ngõ vào có điện áp bằng không thì điện áp ngõ ra bằng không. Nhưng trong thực tế, khi cả hai ngõ vào có điện áp bằng không thì điện áp ngõ ra khác không (điện áp offset ngõ ra). Nguyên nhân là do có sự bất đối xứng ở ngõ vào làm cho điện áp vào khác không (điện áp offset ngõ vào). Do đó cần phải có mạch điều chỉnh điện áp ngõ vào sao cho khi đó điện áp ngõ ra bằng không.

Khảo sát mạch khuếch đại căn bản sử dụng Op-Amp: vì Op-Amp có hệ số khuếch đại A rất lớn nên phải dùng hồi tiếp âm, ta có hai dạng mạch khuếch đại căn bản sau:

10.3.1 Mạch khuếch đại đảo

Dạng mạch căn bản của mạch khuếch đại đảo như sau:



Hình 10.12: Mạch khuếch đại đảo

Tín hiệu v_i được đưa vào ở ngõ vào (-) và ngõ vào (+) nối đất. Tín hiệu v_i có thể xoay chiều hoặc một chiều. Ta có $v_a = v_{in+}$ và $v_b = v_{in-}$

Op-Amp lý tưởng ($v_{in+} = v_{in-}$ và $i_+ = i_- = 0$) nên ta có: $v_a = v_b = 0$ (do v_a nối đất).

$$\text{Suy ra: } i_i = -i_f \Leftrightarrow \frac{v_i}{R_i} = -\frac{v_o}{R_f}$$

Từ đó suy ra độ lợi điện áp của mạch:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_i}$$

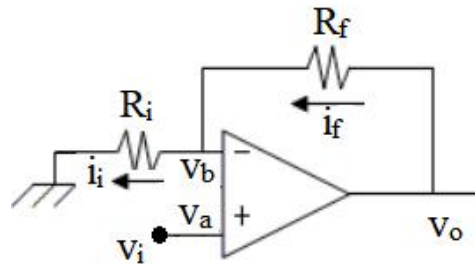
$$\Leftrightarrow v_o = -\frac{R_f}{R_i} v_i$$

Nhận xét:

- Khi $R_f = R_i$ thì ta có $v_o = -v_i$ hay v_o và v_i lệch pha 180° nên còn được gọi là mạch khuếch đại đảo và ngõ vào (-) được gọi là ngõ vào đảo.
- R_f đóng vai trò mạch hồi tiếp âm. R_f càng lớn (hồi tiếp âm càng nhỏ) độ khuếch đại của mạch càng lớn.
- Khi R_f và R_i là điện trở thuần thì Op-Amp có tính khuếch đại cả điện áp một chiều.

10.3.2 Mạch khuếch đại không đảo

Dạng mạch căn bản của mạch khuếch đại không đảo như sau.



Hình 10.13: Mạch khuếch đại không đảo

Ta có $v_a = v_{in+}$ và $v_b = v_{in-}$

Do Op-Amp lý tưởng ($v_{in+} = v_{in-}$ và $i_+ = i_- = 0$), nên ta có: $v_a = v_b = v_i$ và $i_f = i_i$

Ta có dòng qua R_f và R_i được xác định như sau:

$$i_f = \frac{v_o - v_b}{R_f}; i_i = \frac{v_b}{R_i}$$

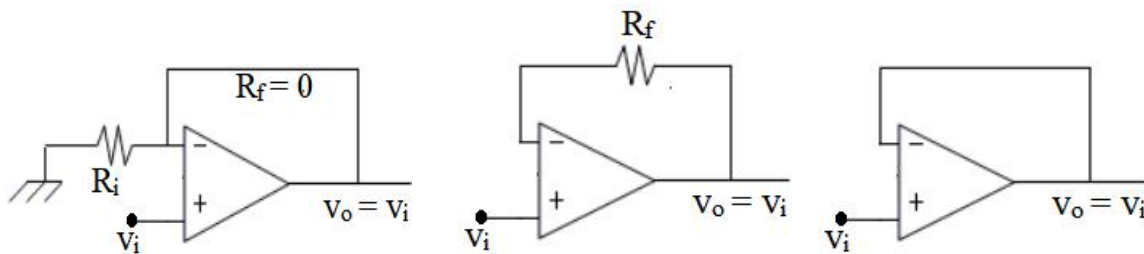
$$i_f = i_i \Rightarrow \frac{v_o - v_b}{R_f} = \frac{v_b}{R_i}$$

Mà ta có $v_b = v_i$, suy ra:

$$\begin{aligned} \frac{v_o - v_i}{R_f} &= \frac{v_i}{R_i} \Leftrightarrow \frac{v_o - v_i}{v_i} = \frac{R_f}{R_i} \\ \Leftrightarrow \frac{v_o}{v_i} - 1 &= \frac{R_f}{R_i} \Leftrightarrow \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \\ \Leftrightarrow A_v &= \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \\ \Leftrightarrow v_o &= \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) v_i \end{aligned}$$

Nhận xét:

- Khi R_f, R_i là điện trở thuần thì ngõ ra v_o sẽ có cùng pha với ngõ vào v_i (nên mạch được gọi là mạch khuếch đại không đảo và ngõ vào (+) được gọi là ngõ vào không đảo).
- R_f đóng vai trò hồi tiếp âm. Để tăng độ khuếch đại A_v , ta có thể tăng R_f hoặc giảm R_i .
- Mạch khuếch đại cả tín hiệu một chiều khi R_f và R_i là điện trở thuần. Mạch cũng giữ nguyên tính chất không đảo và có cùng công thức với trường hợp của tín hiệu xoay chiều.
- Khi $R_f = 0$, ta có: $A_v = 1 \Rightarrow v_o = v_i$ hoặc $R_i = \infty$ ta cũng có $A_v = 1$ và $v_o = v_i$ (hình 10.13). Lúc này mạch được gọi là mạch theo điện áp (voltage follower) thường được dùng làm mạch đệm (buffer) vì có tổng trở vào lớn và tổng trở ra nhỏ như mạch cực thu chung ở BJT.



Hình 10.14: Mạch theo điện áp (voltage follower)

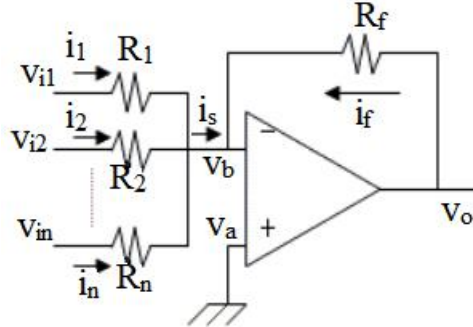
10.4 Ứng dụng của Op-Amp

10.4.1 Mạch làm toán

Đây là các mạch điện tử đặc biệt trong đó sự liên hệ giữa điện áp ngõ vào và ngõ ra là các phương trình toán học đơn giản.

a) Mạch cộng:

- **Mạch cộng đảo:** xét sơ đồ mạch cộng đảo như sau.



Hình 10.15: Sơ đồ mạch cộng đảo

Op-Amp lý tưởng nên ta có: $v_a = v_b = 0$ (hay v_b nối đất)

Từ mạch trên ta có các dòng điện chạy qua các điện trở như sau:

$$i_1 = \frac{v_{i1}}{R_1}; i_2 = \frac{v_{i2}}{R_2}; \dots; i_n = \frac{v_{in}}{R_n}$$

$$\text{Suy ra: } i_s = i_1 + i_2 + \dots + i_n = \frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \dots + \frac{v_{in}}{R_n}$$

$$\text{Mà ta có: } i_f = -i_s$$

$$v_o = R_f \cdot i_f = -R_f \cdot i_s$$

Suy ra:

$$v_o = -R_f \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \dots + \frac{v_{in}}{R_n} \right)$$

Hay:

$$v_o = \sum_{j=1}^n k_j v_{ij}$$

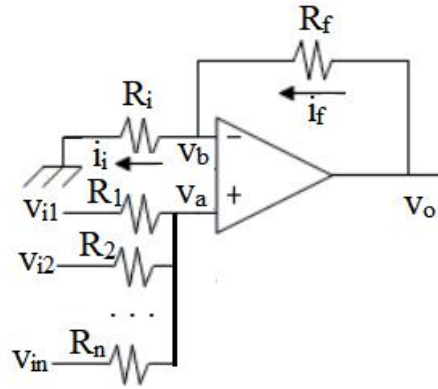
$$\text{Trong đó: } k_1 = -\frac{R_f}{R_1}; k_2 = -\frac{R_f}{R_2}; \dots; k_n = -\frac{R_f}{R_n}$$

Xét trường hợp đặc biệt: $R_f=R_1=R_2=\dots=R_n$ thì ta có:

$$V_o = -\sum_{j=1}^n V_{ij}$$

Tín hiệu ngõ ra bằng tổng các tín hiệu ngõ vào nhưng ngược pha. Ta chú ý v_i là điện áp bất kỳ có thể là một chiều hoặc xoay chiều.

- **Mạch cộng không đảo:** xét sơ đồ mạch cộng không đảo như sau.



Hình 10.16: Sơ đồ mạch cộng không đảo

Op-Amp lý tưởng nên ta có: $v_a = v_b = \frac{R_i}{R_i + R_f} v_o$

Gọi i_1, i_2, \dots, i_n là dòng điện ở ngõ vào và ta có: $i_1 + i_2 + \dots + i_n = i_+ = 0$ (do Op-Amp lý tưởng). Với: $i_1 = \frac{v_{i1} - v_a}{R_1}; i_2 = \frac{v_{i2} - v_a}{R_2}; \dots; i_n = \frac{v_{in} - v_a}{R_n}$

Suy ra:
$$\frac{v_{i1} - v_a}{R_1} + \frac{v_{i2} - v_a}{R_2} + \dots + \frac{v_{in} - v_a}{R_n} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{v_{i1}}{R_1} - \frac{v_a}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} - \frac{v_a}{R_2} + \dots + \frac{v_{in}}{R_n} - \frac{v_a}{R_n} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \dots + \frac{v_{in}}{R_n} = \frac{v_a}{R_1} + \frac{v_a}{R_2} + \dots + \frac{v_a}{R_n}$$

$$\Leftrightarrow \frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \dots + \frac{v_{in}}{R_n} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) v_a$$

Mà ta có: $v_a = v_b = \frac{R_i}{R_i + R_f} v_o$; thay vào biểu thức trên ta được:

$$\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \dots + \frac{v_{in}}{R_n} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) \left(\frac{R_i}{R_i + R_f} \right) v_o$$

$$\Leftrightarrow v_o = \left(\frac{R_i + R_f}{R_i} \right) \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \dots + \frac{v_{in}}{R_n} \right) \left(\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \right)$$

Đặt $R_p = R_1 // R_2 // \dots // R_n \Leftrightarrow \frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ thay vào biểu thức v_o ta được:

$$v_o = \left(\frac{R_i + R_f}{R_i} \right) \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \dots + \frac{v_{in}}{R_n} \right) R_p$$

$$\Leftrightarrow v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \dots + \frac{v_{in}}{R_n} \right) R_p$$

Xét trường hợp đặc biệt: $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$

$$\Rightarrow \frac{1}{R_p} = \frac{n}{R} \Rightarrow R_p = \frac{R}{n}$$

Như vậy suy ra:

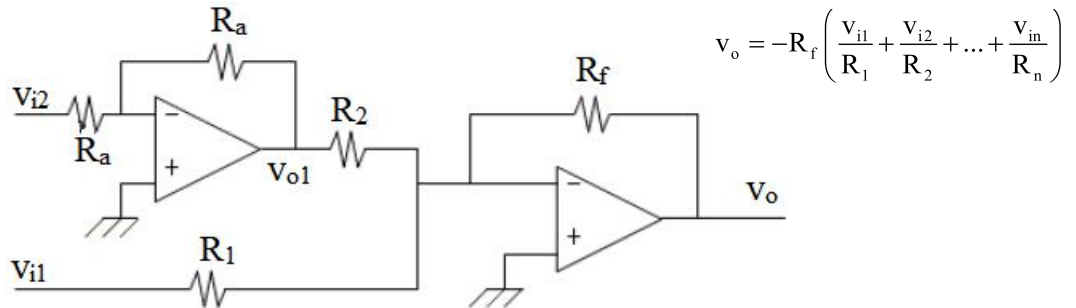
$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \left(\frac{v_{i1} + v_{i2} + \dots + v_{in}}{R} \right) \frac{R}{n}$$

$$\Leftrightarrow v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \left(\frac{v_{i1} + v_{i2} + \dots + v_{in}}{n} \right)$$

b) Mạch trừ:

Ta có 2 cách tạo mạch trừ.

- **Trừ bằng phương pháp đổi dấu:** Để trừ một số, ta cộng với số đối của số đó.



Hình 10.17: Mạch trừ bằng phương pháp đổi dấu

Xét tầng đầu tiên, đây là mạch khuếch đại đảo nên ta có: $v_{o1} = -v_{i2}$

Xét tầng thứ 2, đây là mạch cộng đảo, thực hiện cộng 2 tín hiệu vào là v_{i1} và $-v_{i2}$, nên ta có:

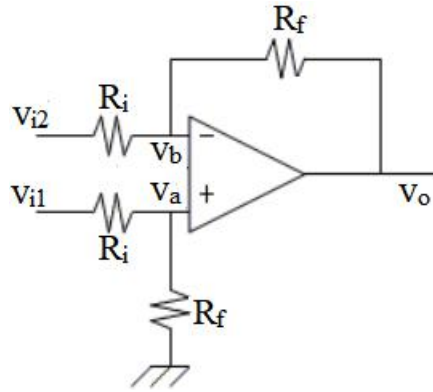
$$v_o = -R_f \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{(-v_{i2})}{R_2} \right) = -R_f \left(\frac{v_{i1}}{R_1} - \frac{v_{i2}}{R_2} \right)$$

Trường hợp đặc biệt nếu $R_f = R_1 = R_2$, thì ta được:

$$v_o = -(v_{i1} - v_{i2}) = v_{i2} - v_{i1}$$

Như vậy ta thấy tín hiệu ở ngõ ra là hiệu của hai tín hiệu ngõ vào.

- Trừ bằng mạch vi sai: Dạng mạch cơ bản như sau



Hình 10.18: Mạch trừ bằng mạch vi sai

Cách 1:

Do Op-Amp lý tưởng nên ta có:

$$v_a = v_b = \frac{R_f}{R_f + R_i} v_{i1}$$

Ta có dòng điện vào từ v_{i2} qua R_i bằng với dòng điện qua R_f nên ta có:

$$\begin{aligned}\frac{v_{i2} - v_b}{R_i} &= \frac{v_b - v_o}{R_f} \\ \Leftrightarrow v_o &= v_b - \frac{R_f}{R_i}(v_{i2} - v_b) \\ \Leftrightarrow v_o &= v_b - \frac{R_f}{R_i}v_{i2} + \frac{R_f}{R_i}v_b \\ \Leftrightarrow v_o &= v_b \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) - \frac{R_f}{R_i}v_{i2} = v_b \left(\frac{R_i + R_f}{R_i}\right) - \frac{R_f}{R_i}v_{i2}\end{aligned}$$

Thay v_b vào v_o ta được:

$$\begin{aligned}v_o &= v_{i1} \frac{R_f}{R_f + R_i} \left(\frac{R_i + R_f}{R_i}\right) - \frac{R_f}{R_i}v_{i2} \\ \Leftrightarrow v_o &= v_{i1} \frac{R_f}{R_i} - \frac{R_f}{R_i}v_{i2} = \frac{R_f}{R_i}(v_{i1} - v_{i2})\end{aligned}$$

Trường hợp đặc biệt nếu $R_f = R_i$, suy ra: $v_o = (v_{i1} - v_{i2})$

Như vậy ta thấy rằng tín hiệu ở ngõ ra là hiệu của hai tín hiệu ngõ vào.

Cách 2:

- Khi $v_{i1} = 0$ ($v_a = 0$), $v_{i2} \neq 0$, mạch sẽ trở thành mạch khuếch đại đảo nên ta có:

$$v_{o2} = -\frac{R_f}{R_i}v_{i2}$$

- Khi $v_{i1} \neq 0$, $v_{i2} = 0$, mạch sẽ trở thành mạch khuếch đại không đảo nên ta có:

$$v_{o1} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)v_a$$

Mà ta có cầu phân áp tại (v_a): $v_a = \frac{R_f}{R_f + R_i}v_{i1}$

Thay v_a vào v_{o1} ta được:

$$v_{o1} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \left(\frac{R_f}{R_f + R_i}\right)v_{i1} = \left(\frac{R_i + R_f}{R_i}\right) \left(\frac{R_f}{R_f + R_i}\right)v_{i1} = \frac{R_f}{R_i}v_{i1}$$

- Khi có cả 2 tín hiệu vào v_{i1} và v_{i2} nên ta có tín hiệu ra:

$$v_o = v_{o1} + v_{o2} = \frac{R_f}{R_i} v_{i1} - \frac{R_f}{R_i} v_{i2}$$

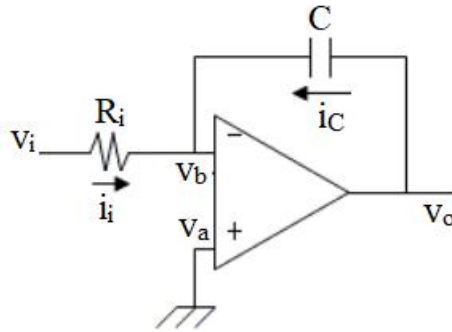
$$\Leftrightarrow v_o = \frac{R_f}{R_i} (v_{i1} - v_{i2})$$

Trường hợp đặc biệt nếu $R_f = R_i$, suy ra: $v_o = (v_{i1} - v_{i2})$.

Như vậy ta thấy rằng tín hiệu ở ngõ ra là hiệu của hai tín hiệu ngõ vào.

c) Mạch tích phân:

Dạng mạch tích phân như sau:



Hình 10.19: Mạch tích phân

Op-Amp lý tưởng nên ta có: $v_a = v_b = 0$ (hay v_b nối đất)

Ta có dòng điện đi qua tụ được tính bởi công thức:

$$i_c = C \frac{dv_o}{dt}$$

Mà ta có: $i_i = -i_c$

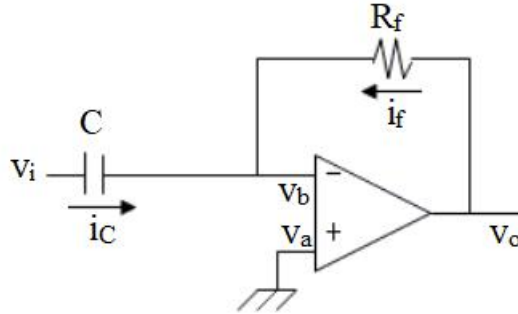
$$\Rightarrow i_i = -C \frac{dv_o}{dt} \Leftrightarrow dv_o = -\frac{1}{C} i_i dt \Leftrightarrow v_o = -\frac{1}{C} \int i_i dt$$

Mặc khác: $i_i = \frac{v_i}{R_i}$ thay vào v_o ta được:

$$v_o = -\frac{1}{R_i C} \int v_i dt$$

d) Mạch vi phân

Dạng mạch vi phân như sau:



Hình 10.20: Mạch vi phân

Op-Amp lý tưởng nên ta có: $v_a = v_b = 0$ (hay v_b nối đất)

Ta có dòng điện đi qua tụ được tính bởi công thức:

$$i_c = C \frac{dv_i}{dt}$$

Mà ta có: $i_f = -i_c \Leftrightarrow i_f = -C \frac{dv_i}{dt}$

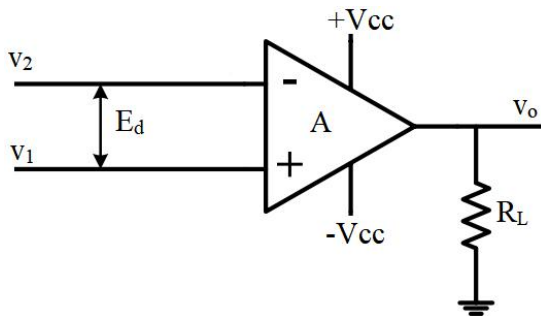
Mặt khác: $i_f = \frac{v_o}{R_f}$ thay vào biểu thức trên ta được:

$$\frac{v_o}{R_f} = -C \frac{dv_i}{dt} \Leftrightarrow v_o = -R_f C \frac{dv_i}{dt}$$

10.4.2 Mạch so sánh

a) Điện áp ngõ ra bão hòa

Ta xem mạch như hình sau:



Hình 10.21

Ta có: $v_o = A(v_1 - v_2) = A.E_d$

Với $E_d = v_1 - v_2$

E_d là điện áp khác nhau giữa 2 ngõ vào và được định nghĩa:

$$E_d = (\text{điện áp ngõ vào } +) - (\text{điện áp ngõ vào } -)$$

Do mạch không có hồi tiếp âm nên:

$$v_o = A.E_d$$

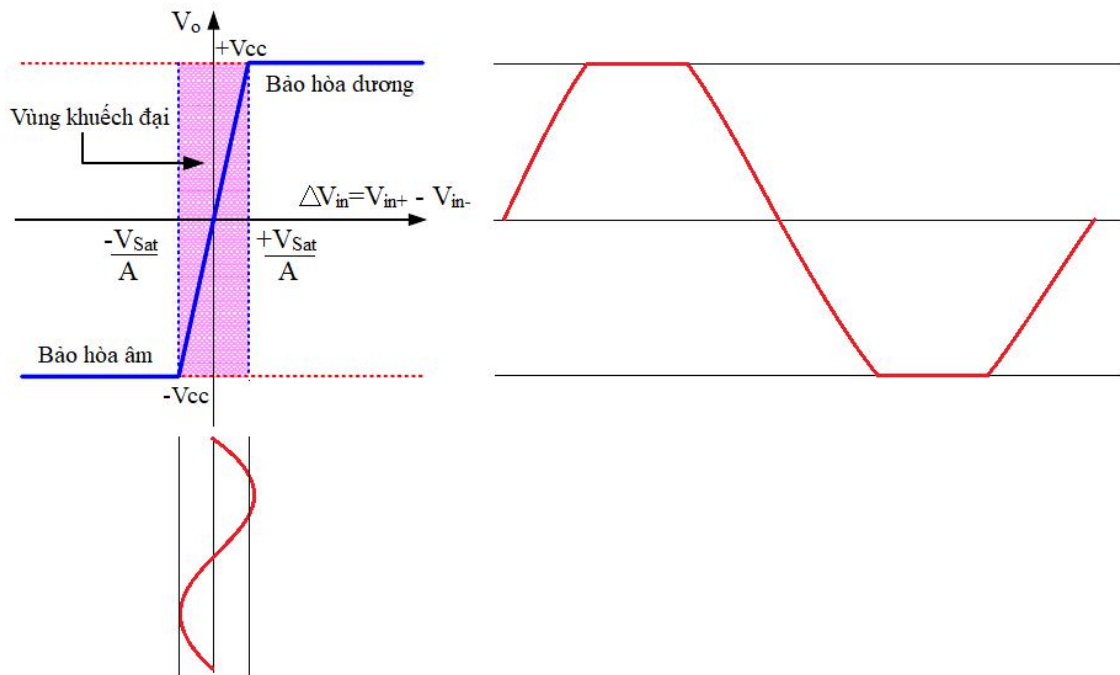
Trong đó A là độ lợi vòng hở của Op-Amp, vì A rất lớn nên theo công thức trên v_o rất lớn. Khi E_d nhỏ, v_o được xác định. Khi E_d vượt quá một trị số nào đó thì v_o đạt đến trị số bão hòa và được gọi là V_{Sat} . Trị số của E_d tùy thuộc vào mỗi Op-Amp và có trị số vào khoảng vài chục μV .

- Khi E_d âm, mạch đảo pha nên $v_o = -V_{Sat}$

- Khi E_d dương, tức $v_1 > v_2$ thì $v_o = +V_{Sat}$

Điện áp ngõ ra bão hòa thường nhỏ hơn điện áp nguồn từ 1 volt đến 2 volt. Để ý là $|+V_{Sat}|$ có thể khác $|-V_{Sat}|$. Như vậy ta thấy điện áp E_d tối đa là:

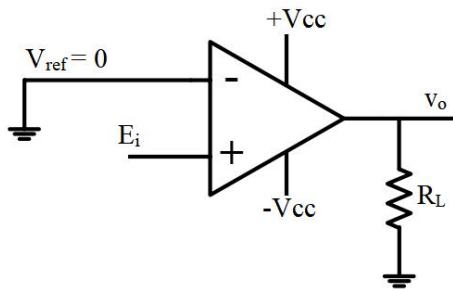
$$+E_{dmax} = \frac{+V_{Sat}}{A} \quad \text{và} \quad -E_{dmax} = \frac{-V_{Sat}}{A}$$



Hình 10.22

b) Mạch so sánh mức 0 (tách mức zero)

- So sánh mức zero không đảo: ta có dạng mạch cơ bản như sau:



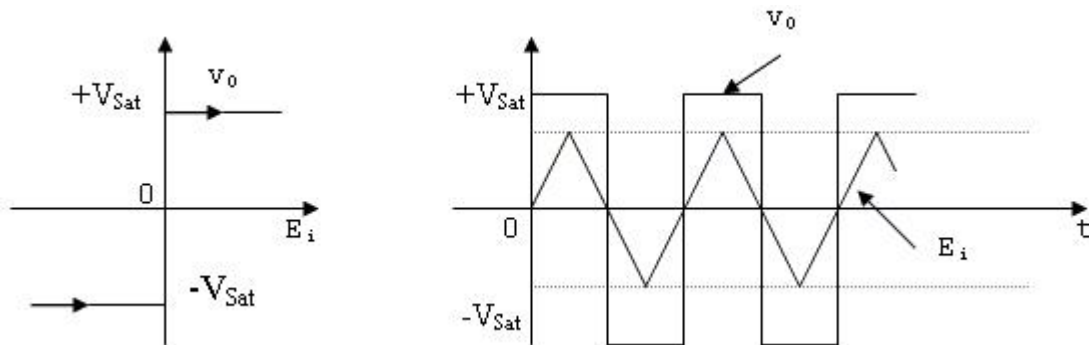
Hình 10.23

Điện áp ở ngõ vào (-) được dùng làm điện áp chuẩn và E_i là điện áp muốn đem so sánh với điện áp chuẩn được đưa vào ngõ vào (+).

Khi $E_i > V_{ref}=0V$ thì $v_o=+V_{Sat}$

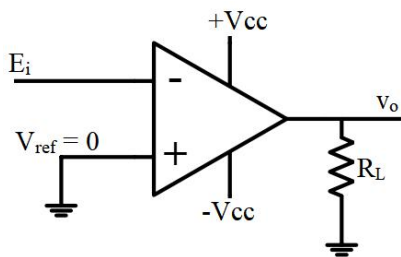
Khi $E_i < V_{ref}=0V$ thì $v_o=-V_{Sat}$

Ví dụ khi E_i có dạng tam giác thì dạng sóng ngõ ra v_o có dạng như hình sau:



Hình 10.24

- Mạch so sánh mức zero đảo: ta có dạng mạch cơ bản như sau:



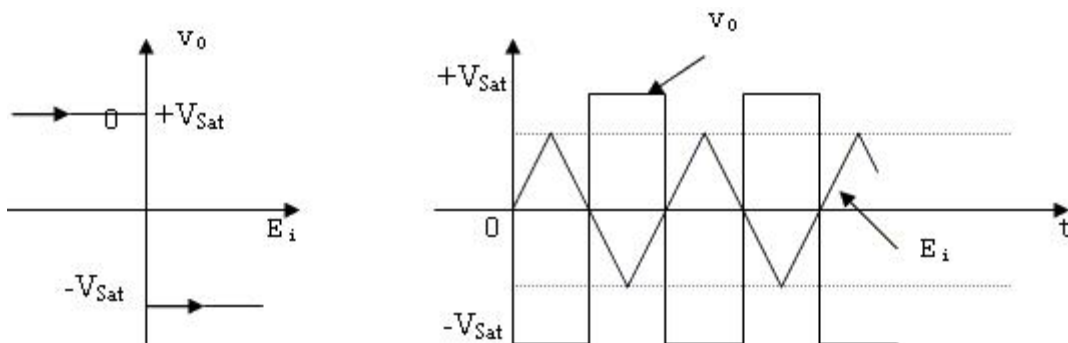
Hình 10.25

Điện áp chuẩn $V_{ref}=0v$ đặt ở ngõ vào (+).

Điện áp so sánh E_i đưa vào ngõ vào (-).

Khi $E_i > V_{ref}=0v$ thì $v_o=-V_{Sat}$

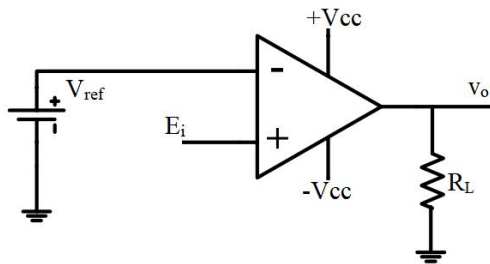
Khi $E_i < V_{ref}=0v$ thì $v_o=+V_{Sat}$



Hình 10.26

c) Mạch so sánh với 2 ngõ vào có điện áp bất kỳ

- So sánh mức dương không đảo:



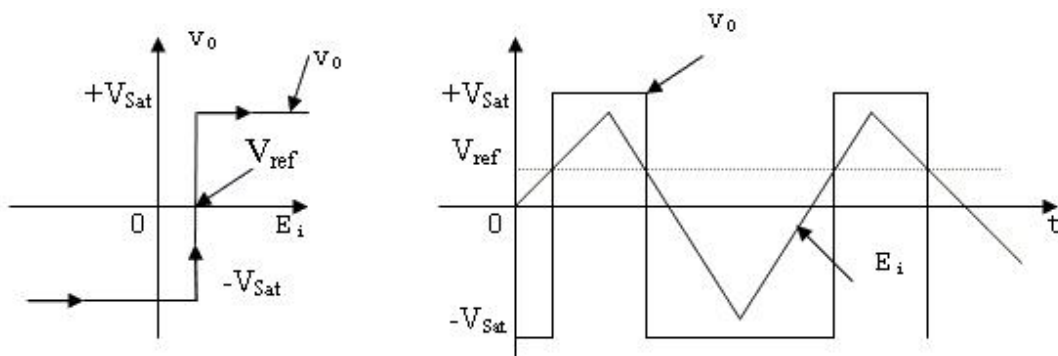
Điện áp chuẩn $V_{ref} > 0V$ đặt ở ngõ vào (-).

Điện áp so sánh E_i đưa vào ngõ vào (+).

Khi $E_i > V_{ref}$ thì $v_o = +V_{Sat}$

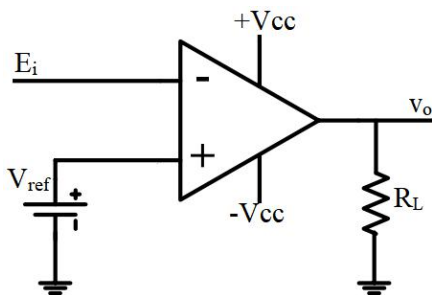
Khi $E_i < V_{ref}$ thì $v_o = -V_{Sat}$

Hình 10.27



Hình 10.28

- So sánh mức dương đảo:



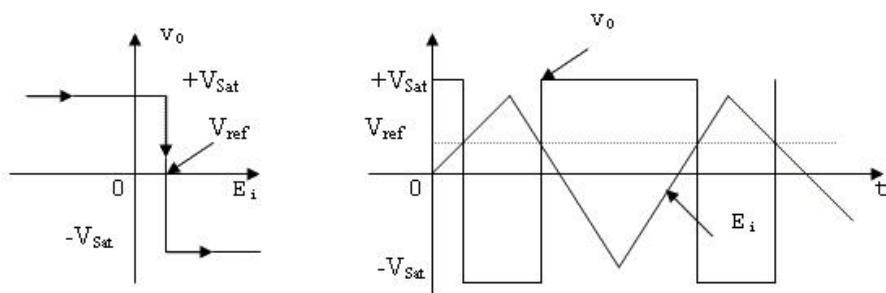
Điện áp chuẩn $V_{ref} > 0V$ đặt ở ngõ vào (+).

Điện áp so sánh E_i đưa vào ngõ vào (-).

Khi $E_i > V_{ref}$ thì $v_o = -V_{Sat}$

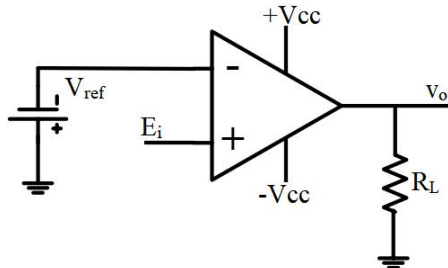
Khi $E_i < V_{ref}$ thì $v_o = +V_{Sat}$

Hình 10.29



Hình 10.30

- So sánh mức âm không đảo:



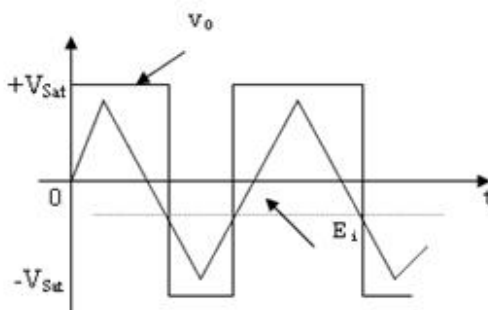
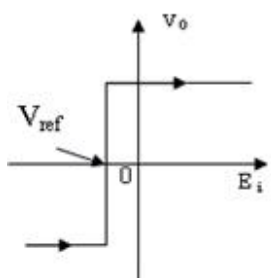
Hình 10.31

Điện áp chuẩn $V_{ref} < 0v$ đặt ở ngõ vào (-).

Điện áp so sánh E_i đưa vào ngõ vào (+).

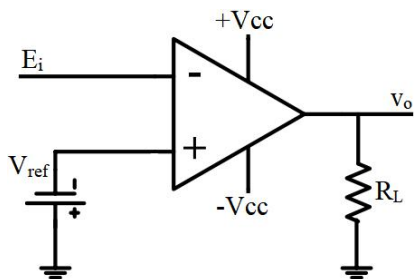
Khi $E_i > V_{ref}$ thì $v_o = +V_{Sat}$

Khi $E_i < V_{ref}$ thì $v_o = -V_{Sat}$



Hình 10.32

- So sánh mức âm đảo:



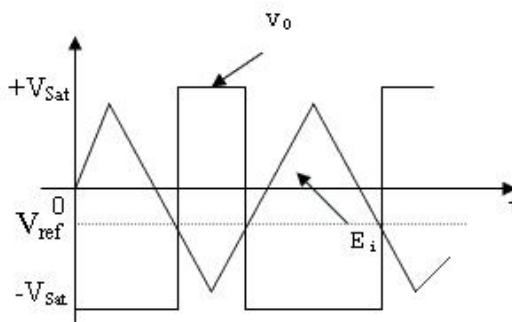
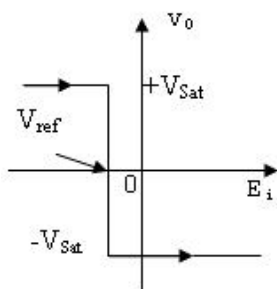
Hình 10.33

Điện áp chuẩn $V_{ref} < 0v$ đặt ở ngõ vào (+).

Điện áp so sánh E_i đưa vào ngõ vào (-).

Khi $E_i > V_{ref}$ thì $v_o = -V_{Sat}$

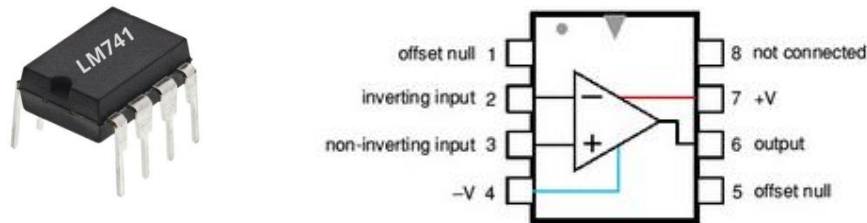
Khi $E_i < V_{ref}$ thì $v_o = +V_{Sat}$



Hình 10.34

10.5 Một số IC Op-Amp

a) **IC Op-Amp LM741:** Hình dạng thực tế và sơ đồ chân của IC Op-Amp LM741 được trình bày như trong hình sau:

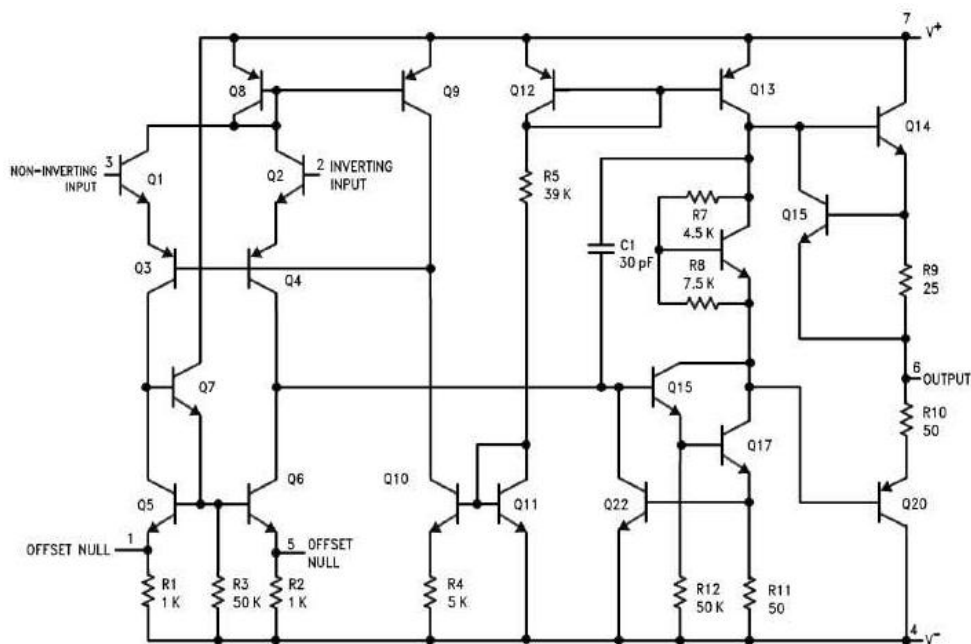


Hình 10.35: IC Op-Amp LM741

IC Op-Amp LM741 gồm có 8 chân, trong đó cần lưu ý các chân chức năng như sau:

- Chân 2 (inverting input): Ngõ vào đảo
- Chân 3 (non-inverting input): Ngõ vào không đảo
- Chân 6 (output): Ngõ ra
- Chân 4 (-V hay -Vcc): Nguồn âm cấp cho Op-Amp (-5V đến -15V)
- Chân 7 (+V hay +Vcc): Nguồn dương cấp cho Op-Amp (+5V đến +15V)
- Chân 1 và 5 (offset null): bù offset
- Chân 8 (not connected): không kết nối

Sơ đồ mạch bên trong của IC Op-Amp LM741 được trình bày như trong hình 10.35.



Hình 10.36: Sơ đồ mạch của IC Op-Amp LM741

Ví dụ: Thiết kế mạch cảnh báo nhiệt độ sử dụng IC Op-Amp LM741 và cảm biến nhiệt độ LM35. Nếu nhiệt độ lớn hơn hoặc bằng 70°C thì LED cảnh báo nhiệt độ sáng, ngược lại thì LED cảnh báo nhiệt độ tắt.

- Op-Amp LM741: cấp nguồn $V_{cc} = \pm 12\text{V}$

- LED: điện áp 2V, dòng điện 10mA.

- Cảm biến nhiệt độ LM35 là một loại cảm biến tương tự (analog), có điện áp đầu ra tuyến tính theo nhiệt độ. LM35 thường được ứng dụng trong việc đo nhiệt độ môi trường thời gian thực. LM35 có các thông số kỹ thuật như sau:

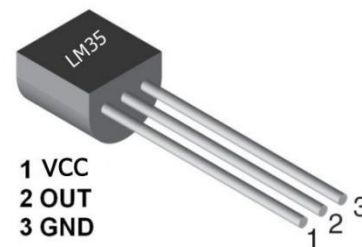
+ Điện áp hoạt động: 4 - 20VDC

+ Công suất tiêu thụ: khoảng 60uA

+ Khoảng nhiệt độ đo: -55°C đến 150°C

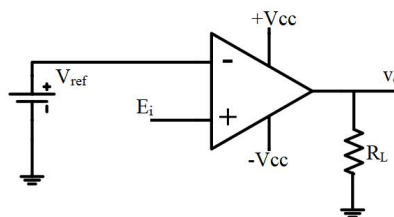
+ Điện áp tuyến tính theo nhiệt độ: $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$

+ Sai số: $0,25^{\circ}\text{C}$



Thiết kế mạch:

- Sử dụng Op-Amp LM741 thiết kế mạch thực hiện chức năng so sánh mức dương không đảo.



Hình 10.37

Trong đó:

+ Điện áp ngưỡng $V_{ref} = 0,7\text{V}$ (tương ứng 70°C) đặt ở ngõ vào (-) của Op-Amp LM741. Sử dụng biến trở để điều chỉnh đạt đến điện áp ngưỡng V_{ref} .

+ Điện áp so sánh E_i (lấy từ ngõ ra của cảm biến LM35) được đưa vào ngõ vào (+) của Op-Amp LM741.

Ghi chú: Vì điện áp ra của LM35 tuyến tính theo nhiệt độ: 1°C tương ứng ngõ ra 10mV, như vậy 70°C tương ứng ngõ ra 700mV (hay 0,7V).

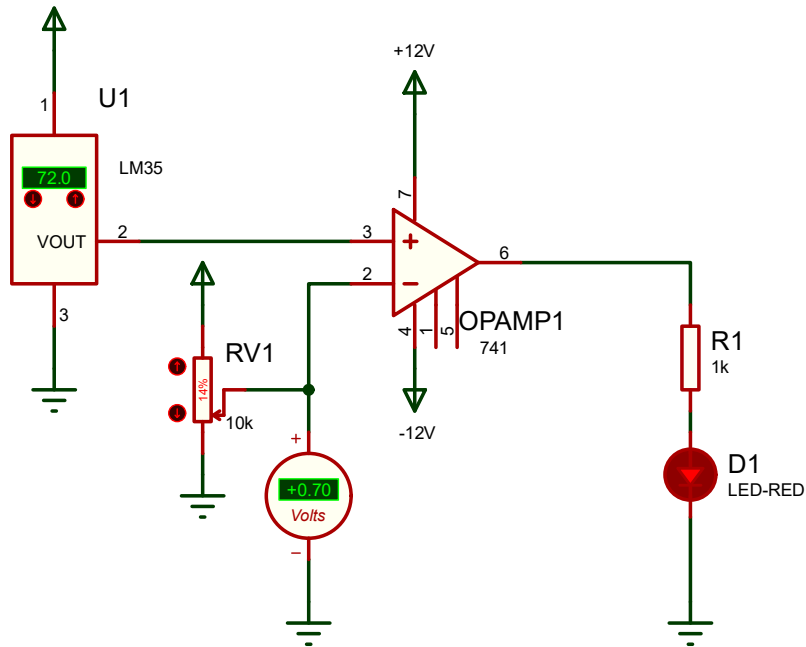
❖ Khi $E_i > V_{ref}$ thì $v_o = +V_{Sat} \approx +V_{cc}$; khi $E_i < V_{ref}$ thì $v_o = -V_{Sat} \approx -V_{cc}$

- Tải ở ngõ ra sử dụng LED (có điện áp 2V, dòng điện 10mA) và điện trở hạn dòng R_1 . Tính toán giá trị điện trở R_1

+ Xét trường hợp khi $E_i > V_{ref}$ thì $v_o = +V_{Sat} \approx +V_{cc} = +12V$.

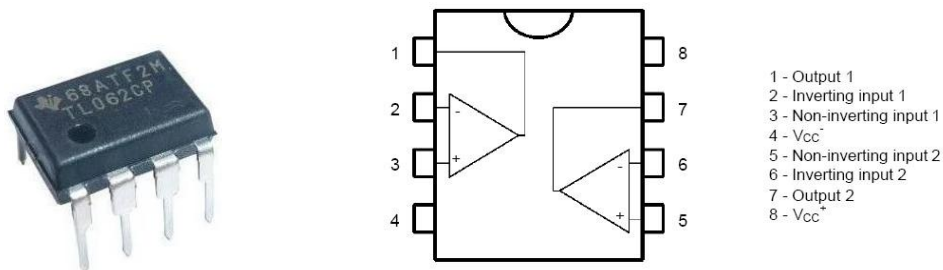
Mà ta có: $v_o = V_{R1} + V_{LED} = 12V$, trong đó $V_{LED} = 2V \Rightarrow V_{R1} = 10V$

Ngoài ra dòng điện qua LED và điện trở R_1 là 10mA $\Rightarrow R_1 = 10V/10mA = 1k\Omega$



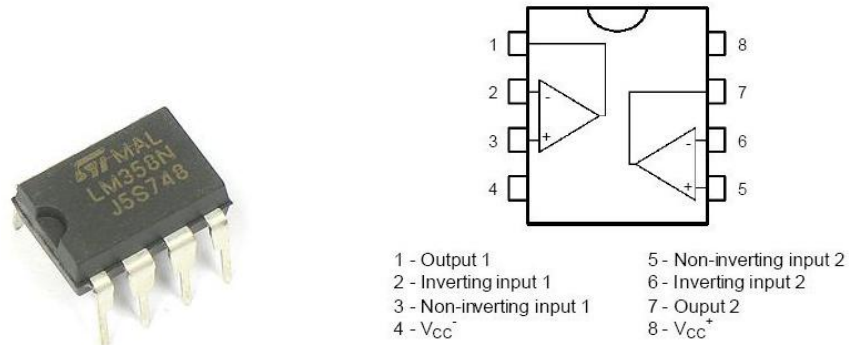
Hình 10.38

b) IC Op-Amp TL062: Hình dạng thực tế và sơ đồ chân của IC Op-Amp TL062 được trình bày như trong hình sau:



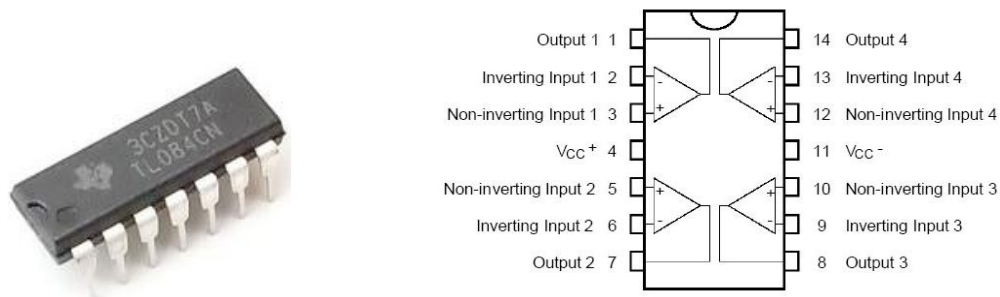
Hình 10.39: IC Op-Amp TL062

c) **IC Op-Amp LM358:** Hình dạng thực tế và sơ đồ chân của IC Op-Amp LM358 được trình bày như trong hình sau:



Hình 10.41: IC Op-Amp LM358

d) **IC Op-Amp TL084:** Hình dạng thực tế và sơ đồ chân của IC Op-Amp TL084 được trình bày như trong hình sau:

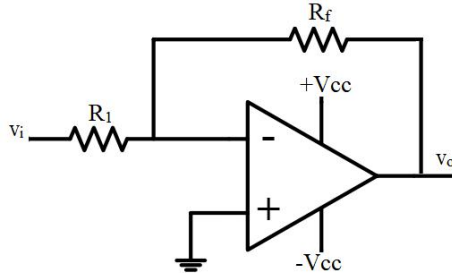


Hình 10.41: IC Op-Amp TL084

Bài tập - Khuếch đại thuật toán

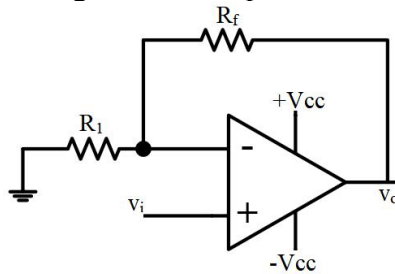
Câu 1: Cho mạch điện Op-Amp lý tưởng như sau, với $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_f=50\text{k}\Omega$, $\pm V_{cc}=\pm 12\text{V}$.

- Xác định hệ số khuếch đại của mạch, cho biết chức năng của mạch này.
- Xác định điện áp ra với mỗi giá trị điện áp vào $v_i=0,2\text{V}$; -1V ; 2V ; -3V ; 4V



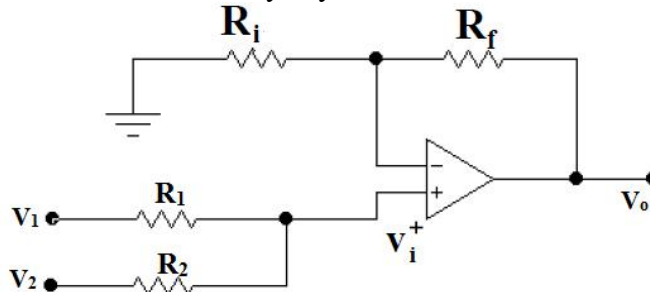
Câu 2: Cho mạch điện Op-Amp lý tưởng như sau, với $R_1=12\text{k}\Omega$, $R_f=180\text{k}\Omega$, $\pm V_{cc}=\pm 12\text{V}$

- Xác định hệ số khuếch đại của mạch, cho biết chức năng của mạch này.
- Xác định điện áp ra với mỗi giá trị điện áp vào $v_i=-0,4\text{V}$; $0,8\text{V}$; $1,2\text{V}$; $-1,4\text{V}$

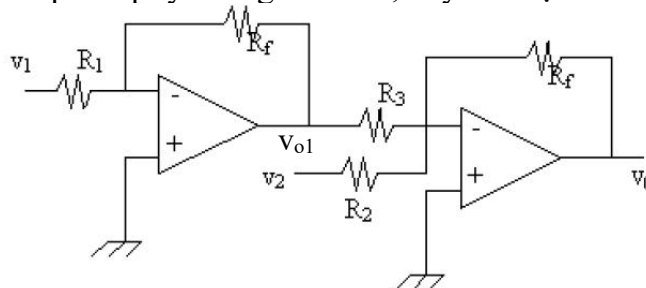


Câu 3: Cho mạch điện Op-Amp lý tưởng như sau.

- Hãy tìm biểu thức điện áp ngõ ra (v_o) theo điện áp vào (v_1 , v_2)
- Nếu chọn giá trị $R_1=R_2$ và $R_i=R_f$, hãy suy ra v_o và cho biết chức năng của mạch này.

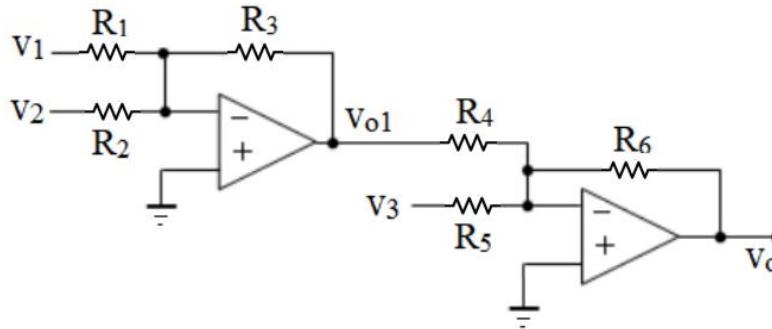


Câu 4: Cho mạch điện Op-Amp lý tưởng như sau, hãy xác định biểu thức v_o .



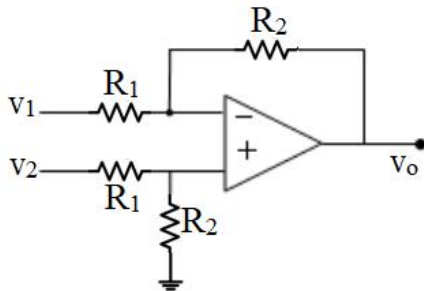
Câu 5: Cho mạch điện Op-Amp lý tưởng như sau.

- Tìm biểu thức điện áp ngõ ra (v_o) theo điện áp vào.
- Tính v_o khi: $v_1=0,2V$; $v_2=0,3V$; $v_3=0,5V$; $\pm V_{cc}=\pm 12V$
 $R_1 = 25k\Omega$; $R_2 = 10k\Omega$; $R_3 = 50k\Omega$; $R_4 = R_6 = 100k\Omega$; $R_5 = 10k\Omega$



Câu 6: Cho mạch điện Op-Amp lý tưởng như sau, với: $R_1=10k\Omega$, $R_2=50k\Omega$, $\pm V_{cc}=\pm 12V$

- Tìm biểu thức điện áp ngõ ra (v_o) theo điện áp vào.
- Tính v_o khi:
 $v_1=4V$; $v_2=2V$
 $v_1=1V$; $v_2=5V$
 $v_1=6V$; $v_2=1V$



Câu 7: Cho mạch điện Op-Amp lý tưởng như sau, với $R=50k\Omega$, $R_1=10k\Omega$, $R_f=30k\Omega$, $\pm V_{cc}=\pm 15V$

- Tìm biểu thức điện áp ngõ ra (v_o) theo điện áp vào.
- Tính v_o khi:
 $v_1=0,3V$; $v_2=1V$; $v_3=-2V$

